

*„Steigerung der Ressourcenproduktivität
als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung“*

Projekt im Auftrag des BMBF



Abschätzung von Potenzialen zur Verringerung des Ressourcen- verbrauchs im Automobilsektor

Projekt **Ergebnisse**

Wuppertal, April 2007

Bearbeitet von:

M.Sc. Isabel van de Sand

Dipl.-Wirt.-Ing. José Acosta-Fernández

Dr. Stefan Bringezu (Leitung)

Unter Mitarbeit von:

Martin Ulbricht

Martin Erren

Deger Saygin



Projektlaufzeit: 07/2005 – 06/2007

Projektleitung:

Prof. Dr. Raimund Bleischwitz / Dr. Kora Kristof / Dr. Christa Liedtke
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH
Forschungsgruppe Stoffströme und Ressourcenmanagement
Forschungsgruppe Nachhaltiges Produzieren und Konsumieren

42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: 0202-2492 -256 /-183, Fax: 0202-2492 -250

E-Mail: raimund.bleischwitz@wupperinst.org
kora.kristof@wupperinst.org

Weitere Informationen zum Projekt „Steigerung der Ressourcenproduktivität
als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung“
finden Sie unter **www.ressourcenproduktivitaet.de**



Inhaltsverzeichnis

1	Ressourcenproduktivitätsprojekt – der Hintergrund	7
2	Ziel und Aufbau des Papers	9
3	Ressourcenverbrauch der gegenwärtigen Produktion von Pkw	10
3.1	Beschreibung der Branche Kraftwagen und Kraftwagenteile	10
3.1.1	Wirtschaftliche Bedeutung des Sektors	11
3.1.2	Entwicklung der Pkw-Produktion	11
3.2	Beschreibung und Trends der Materialkomposition des Produktes Pkw	13
3.3	Methodik zur Berechnung des Ressourcenverbrauchs	17
3.3.1	Datenbasis	17
3.3.2	Berechnung des Ressourcenverbrauches (TMR) für die einzelnen Autoklassen	18
3.4	Ergebnisse	23
3.4.1	Ressourcenverbrauch	23
3.4.2	Vergleich anderer ausgewählter Umweltparameter: Emissionen pro 100 Fahrzeugkilometer	26
3.4.3	Schadstoffemissionen und Problemverlagerungen	29
3.4.4	Hochrechnung auf die Gesamtproduktion	30
3.5	Ressourcenverbrauch der deutschen Automobilproduktion im Zeitverlauf	33
4	Theoretische Potenziale zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs	35
4.1	Veränderung des Anteils der verschiedenen Autoklassen an der produzierten Fahrzeugflotte	35
4.2	Theoretische Potenziale durch Werkstoffsubstitution	35
4.2.1	Substitution von Stahl durch Aluminium	36
4.2.2	Substitution von Stahl durch Kunststoff	45
4.2.3	Multimaterialansatz	48
4.2.3.1	Gegenwärtiges Leichtbaubeispiel: Der Drei-Liter Lupo	48

4.2.3.2	Variation von VW Golf A4 und VW Lupo: Substitution von Stahl durch Kombination von Magnesium, Aluminium und Kohlefaser	50
4.3	Veränderung des Produktdesigns	52
4.3.1	Mittelfristige Zukunftsvision: Der Loremo LS als Beispiel	52
4.3.2	Langfristige Zukunftsvision: Das PAC-Car II als Beispiel	55
4.4	Weitere Einflussmöglichkeiten zur Nutzung von Potenzialen	57
4.4.1	Veränderung der Laufleistung	57
4.4.2	Veränderung des Benzinverbrauches durch eine Obergrenze für CO ₂ -Emissionen pro 100 km	58
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	60
5.1	Zusammenfassung	60
5.2	Schlussfolgerungen	64
5.3	Weiterführende Arbeiten	66
	Danksagung	67
6	Literatur	68
7	Annex	71

Abbildungen

Abb. 1:	Inlandsproduktion deutscher Hersteller von Pkw (1957-2005)	11
Abb. 2:	Export von Pkw (1957-2005)	12
Abb. 3:	Produktion von Pkw nach Segmenten (1996-2004)	13
Abb. 4:	Veränderung der Materialkomposition im Automobil	14
Abb. 5:	Leergewichte verschiedener Pkw von 1970-2002	14
Abb. 6:	Einsatz von Naturfasern für Verbundwerkstoffe in der deutschen Automobilproduktion	17
Abb. 7:	TMR der im Auto eingesetzten Hauptwerkstoffe für verschiedene Autotypen	26
Abb. 8:	CO ₂ -Emissionen in kg pro 100 km verschiedener Fahrzeugtypen	27
Abb. 9:	SO ₂ -Emissionen in kg pro 100 km verschiedener Fahrzeugtypen	28
Abb. 10:	NO _x -Emissionen in kg pro 100 km verschiedener Fahrzeugtypen	28
Abb. 11:	NM VOC-Emissionen in kg pro 100 km verschiedener Fahrzeugtypen	29
Abb. 12:	Entwicklung der Pkw-Produktion nach Segmenten	33
Abb. 13:	Entwicklung TMR (2000-2004)	34
Abb. 14:	Verschiebung des Anteils der produzierten Segmente bei Konstanthaltung des Produktionsvolumens	34
Abb. 15:	Vergleich von konventioneller Stahlbauweise und Aluminiumbauweisen auf Basis des TMR pro Fahrzeug	39
Abb. 16:	Sensitivitätsanalyse: Variierung des Verhältnisses von Primär- und Sekundäraluminium	41
Abb. 17:	Sensitivitätsanalyse: Veränderung des durch Gewichtseinsparung reduzierten Benzinverbrauchs	41
Abb. 18:	Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den Energiebedarf von Stahl und Aluminiumbauweisen (Primär: Sekundäraluminium 1:9)	42
Abb. 19:	Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den Energiebedarf von Stahl und Aluminiumbauweisen (Primär: Sekundäraluminium 1:1)	43

Abb. 20:	Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den Energiebedarf von Stahl und Aluminiumbauweisen (Primär:Sekundäraluminium 9:1)	43
Abb. 21:	Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den TMR von Stahl und Aluminiumbauweisen (Primär:Sekundäraluminium 1:9)	44
Abb. 22:	Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den TMR von Stahl und Aluminiumbauweisen (Primär:Sekundäraluminium 1:1)	44
Abb. 23:	Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den Energiebedarf von Stahl und Aluminiumbauweisen (Primär:Sekundäraluminium 9:1)	45
Abb. 24:	TMR Stahl vs. Kunststoffbauweise	47
Abb. 25:	Sensitivitätsanalyse: Veränderung des Kohlefaseranteils für Epoxidharz	48
Abb. 26:	Sensitivitätsanalyse: Veränderung des Kohlefaseranteils für Polypropylen	48
Abb. 27:	Vergleich des TMR von VW Lupo und VW Golf A4 bei Veränderung des Materialmixes	52
Abb. 28:	Loremo	53
Abb. 29:	PAC-Car II	55

Tabellen

Tab. 1:	Verwendung von Werkstoffen in verschiedenen Teilen des Automobils	15
Tab. 2:	Autoklassen in der Automobilindustrie	18
Tab. 3:	Kraftstoffverbrauch nach verschiedenen Methoden	22
Tab. 4:	TMR verschiedener Autotypen gesamt	24
Tab. 5:	TMR verschiedener Autotypen pro gefahrene 100 km	25
Tab. 6:	Lebenszyklusweite Emissionen pro 100 km für verschiedene Fahrzeugtypen	29
Tab. 7:	Hochrechnung des Materialverbrauches (ohne Rucksäcke und Energie) für die Produktion der einzelnen Autoklassen für das Jahr 2000 in 1000t	31
Tab. 8:	TMR der Produktion nach Autoklassen in 1000t	32
Tab. 9:	Materialeigenschaften und Gewichtseinsparung durch Aluminium	37
Tab. 10:	Materialkomposition und Fahrzeuggewichte von Stahl und Aluminiumbauweisen	38
Tab. 11:	Vergleich der CO ₂ -Emissionen in der Nutzungsphase für Aluminium und Stahlbauweisen	42
Tab. 12:	Vergleich von TMR für spezifische Metalle	50
Tab. 13:	Substitution von Stahl durch Materialmix nach Altmann et al (2002)	51
Tab. 14:	TMR des Loremo	54
Tab. 15:	TMR des PAC-Car II	56
Tab. 16:	Auswirkung der Veränderung der Laufleistung auf den TMR	58
Tab. 17:	TMR und Emissionen für verschiedene Autotypen	62
Tab. 18:	Theoretische Potenziale zur Verringerung des Ressourcenaufwandes (TMR_Produktion) der gesamten Pkw-Produktion (negative Werte bedeuten eine Erhöhung des Ressourcenverbrauchs)	63
Tab. 19:	Theoretische Potenziale zur Verringerung des Ressourcenaufwandes (TMR_Gesamt) der gesamten Pkw-Produktion (negative Werte bedeuten eine Erhöhung des Ressourcenverbrauchs)	64
Tab. 20:	Materialeigenschaften der Kohlefasern auf PAN Basis	71
Tab. 21:	Materialeigenschaften des Matrixwerkstoffes	71

1 Ressourcenproduktivitätsprojekt – der Hintergrund

Natürliche Ressourcen sind Grundlage aller wirtschaftlichen Aktivitäten. Wohlfahrtssteigerungen können durch eine optimale und effiziente Nutzung der Ressourcen erzielt werden. Das Management der natürlichen Ressourcen ist aber gerade in den letzten Jahren zur Herausforderung geworden. Das anhaltende Wachstum der Weltbevölkerung, die Steigerung der weltweiten Produktion und Preissteigerungen auf den Energie- und Rohstoffmärkten erhöhen den langfristigen Anpassungsdruck zu Effizienzsteigerungen beim Einsatz natürlicher Ressourcen.

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt „Ressourcenproduktivität als Kernstrategie einer Nachhaltigen Entwicklung“ will Möglichkeiten aufzeigen, wie die Rahmenbedingungen wirtschaftlichen Handelns mit betrieblichen und sektoralen Strategien so gestaltet werden können, dass es zu einer tiefgreifenden Erhöhung der Ressourcenproduktivität kommt (www.ressourcenproduktivitaet.de). Die zentralen Projektziele sind:

- **Weiterentwicklung von Informationssystemen** (Arbeitspaket 1) mit dem Ziel einer Aktivierung von Lernprozessen auf betrieblicher, zwischenbetrieblicher und wirtschaftspolitischer Handlungsebene,
- **Hot Spots** (Arbeitspaket 2): Identifizierung von Problembereichen der Ressourcennutzung und von Potenzialen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz¹ jenseits vorhandener Trends,
- **Ressourcenpolitik und Ressourcenproduktivitätssteigerungen durch unternehmensübergreifende Instrumente** (Arbeitspaket 3): Entwicklung von Anreizstrukturen und -instrumenten zur Steigerung der Ressourcenproduktivität im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung,
- **Hochrechnung von Verbesserungspotenzialen zur Ressourcenproduktivitätssteigerung** (Arbeitspaket 4): Abschätzung theoretischer sektoraler Verbesserungspotenziale der Ressourcenproduktivität durch die Be- und Hochrechnung der direkten und indirekten Auswirkungen einer Vorleistungseinsatzsenkung, einer veränderten Endnachfragestruktur und ausgewählter Technologien.

¹ Ressourcenproduktivität wird in diesem Projekt verstanden als die erzielte Wertschöpfung pro Einheit dafür erforderlicher Ressourcen auf der gesamtwirtschaftlichen oder sektoralen Ebene. Ressourceneffizienz wird verstanden als Verhältnis zwischen technisch-physikalischem oder betrieblichem Output zu den dafür erforderlichen Ressourcen auf der Technologie-, Produkt-, Unternehmens- oder Wertschöpfungskettenebene.

2 Ziel und Aufbau des Papers

Ziel des Arbeitspaketes 4 ist es, aussichtsreiche Verbesserungspotenziale zur Verminderung des Ressourcenaufwandes bzw. zur Erhöhung der Ressourcenproduktivität durch technologische und institutionelle Maßnahmen in ihrer theoretischen Größenordnung für die Gesamtwirtschaft abzuschätzen.

Aufgrund ihrer Bedeutung als eine der ressourcenintensivsten Branchen bzw. Produktgruppen soll hier die Produktgruppe Pkw näher betrachtet werden sowie Potenziale zur Verminderung des Ressourcenaufwandes abgeschätzt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es jedoch zunächst nötig, die gegenwärtige Produktion von Pkw zu analysieren, bevor Potenziale für eine Ressourceneinsparung ermittelt werden können. Das Paper ist daher in zwei Teile gegliedert:

Teil eins analysiert den Ressourcenverbrauch, der mit der gegenwärtigen Produktion von Pkw verbunden ist. Dabei wird zunächst ein Überblick über die Branche Kraftwagen und Kraftwagenteile sowie das Produkt Pkw gegeben. Anschließend wird die Methodik zur Ermittlung des Ressourcenverbrauchs näher erläutert und Ergebnisse, differenziert nach Kleinwagen, Mittelklasse und Oberklasse, präsentiert.

Der zweite Teil des Papers beschäftigt sich mit Potenzialen zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs für das Produkt Auto. Dabei werden insbesondere Potenziale durch Werkstoffsubstitution, Produktdesign und eine veränderte Nutzung analysiert.

3 Ressourcenverbrauch der gegenwärtigen Produktion von Pkw

3.1 Beschreibung der Branche Kraftwagen und Kraftwagenteile

Die Branche Kraftwagen und Kraftwagenteile (NACE Klassifikation 34) umfasst die Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenmotoren, Karosserien, Aufbauten und Anhänger sowie Teile und Zubehör für Kraftwagen und Kraftwagenmotoren. Die Herstellung von Kraftwagen beinhaltet dabei sowohl die Herstellung von Personenkraftwagen und Wohnmobilen als auch von Omnibussen, Lastkraftwagen, Sattel- und Straßenzugmaschinen sowie Muldenkipper, Kranwagen und Kraftfahrzeuge für besondere Zwecke. Für das vorliegende Paper wurde jedoch nur die Herstellung von Personenkraftwagen betrachtet.

3.1.1 Wirtschaftliche Bedeutung des Sektors

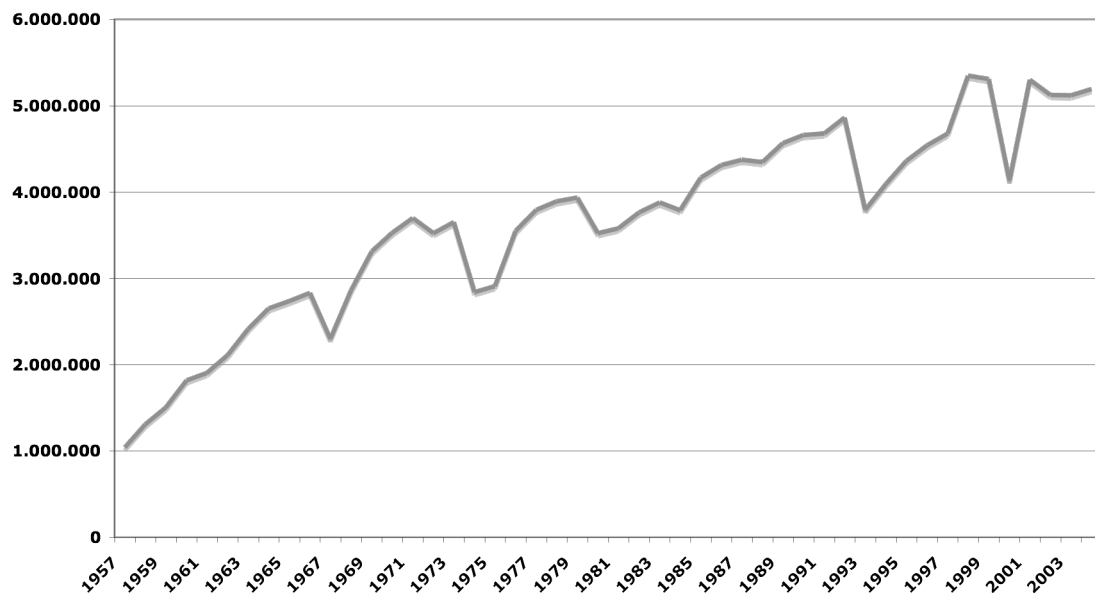
Die Automobilindustrie gilt als eine der Schlüsselindustrien in Deutschland. Sie erzielte 2004 einen Gesamtumsatz von 228 Mrd. Euro, wovon ca. 154 Mrd. Euro auf die Herstellung von Kraftwagen sowie 65 Mrd. Euro auf die Herstellung von Kfz-Teilen und Zubehör und 8,6 Mrd. Euro auf die Herstellung von Anhängern und Aufbauten entfiel.

Insgesamt beschäftigte die Automobilindustrie 2004 rund 800.000 Personen, wobei die Mehrheit der Beschäftigten (408.000) bei der Herstellung von Kraftwagen tätig war (VDA, 2005).

Die wirtschaftliche Bedeutung des Sektors auf dem europäischen und Weltmarkt wird ebenfalls deutlich, wenn man die Anzahl der in Deutschland produzierten Kraftwagen mit der Weltautomobilproduktion vergleicht. Demnach wurden in Deutschland im Jahr 2004 ca. 35% aller in der EU produzierten Personenkraftwagen und ca. 9,7% der Weltproduktion hergestellt.

3.1.2 Entwicklung der Pkw-Produktion

Abb. 1: Inlandsproduktion deutscher Hersteller von Pkw (1957-2005)

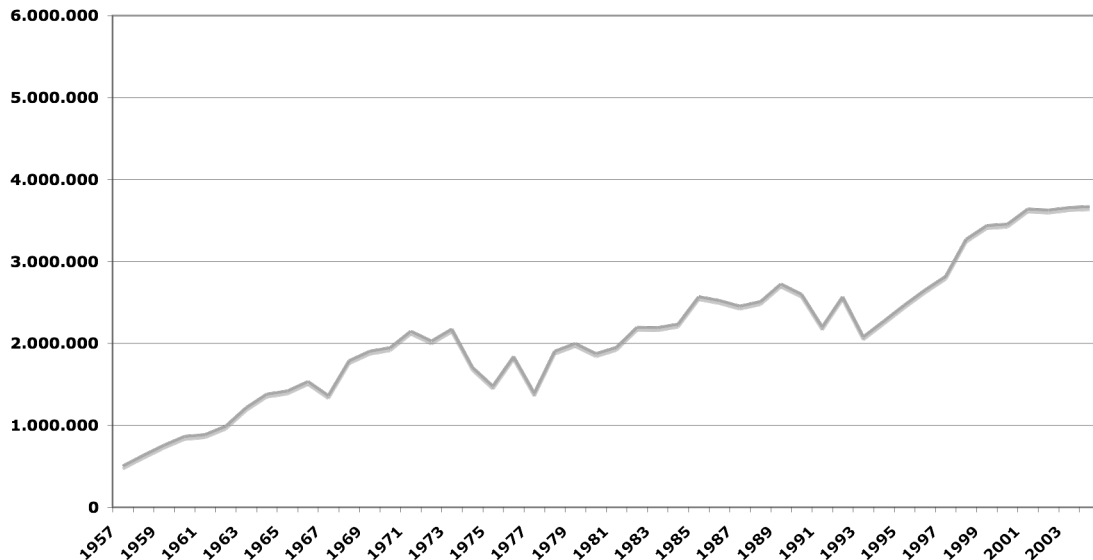


Quelle: VDA (2005)

Die Mehrheit der Pkw wurde in Deutschland für den ausländischen Markt produziert, wie die Exportentwicklung in Abb. 2 veranschaulicht. Davon wurden die meisten Fahrzeuge in andere europäische Länder exportiert (ca. 2,6 Mio. Fahrzeuge, davon ca. 2,2 Mio. Fahrzeuge innerhalb der EU-15), gefolgt von Amerika mit 618.000 Pkw (davon 546.000 für die USA) und Asien mit 276.000 Pkw (wobei China und Japan den größten Anteil ausmachen). Australien und Ozeanien sowie Afrika (hauptsächlich Südafrika)

spielen als Exportregionen im Vergleich mit rund je 52.000 Pkw eher eine Nebenrolle (VDA 2005).

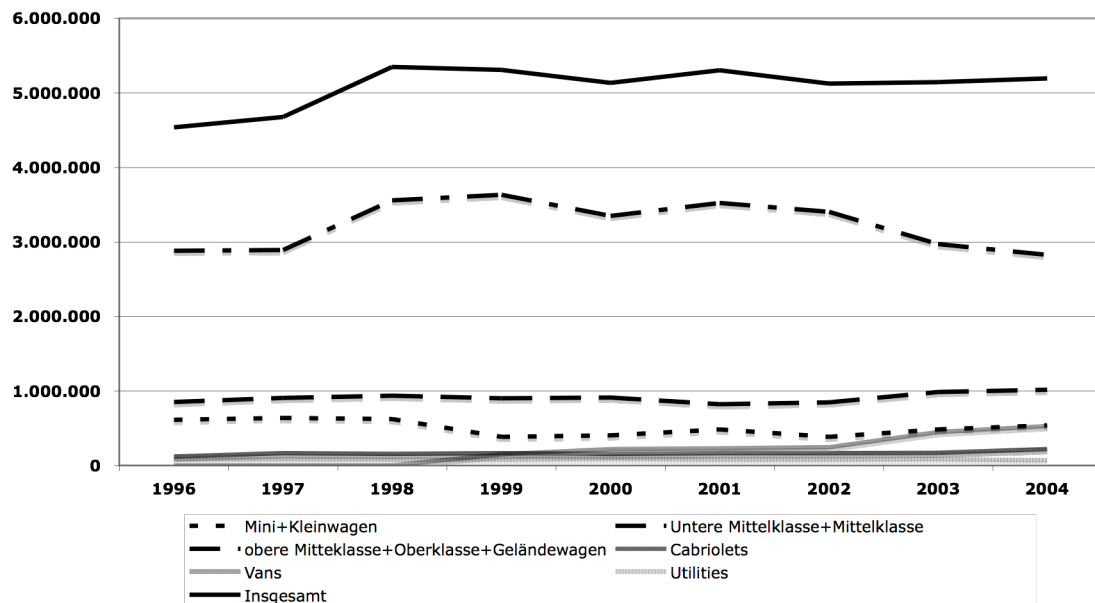
Abb. 2: Export von Pkw (1957-2005)



Quelle: VDA (2005)

Abb. 3 zeigt die Produktion von Pkw nach Segmenten. Der Verband der Automobilindustrie unterscheidet zwischen 10 verschiedenen Segmenten (VDA, 2005). Zur Vereinfachung wurden diese in drei Klassen zusammengefasst: Kleinwagen (Mini und Kleinwagen), Mittelklassewagen (untere Mittelklasse und Mittelklasse) und Oberklassewagen (Obere Mittelklasse, Oberklasse und Geländewagen). Von den im Jahr 2004 5.192.101 produzierten Pkw entfielen ca. 10,3% auf Kleinwagen, 54,4% auf Mittelklassewagen und 19,6% auf Oberklassewagen. Cabriolets, Vans und Utilities, die für das vorliegende Paper nicht weiter berücksichtigt werden, machen einen Anteil von jeweils 4,2%, 10,2% und 1,3% aus. Die Abbildung zeigt auch eine leichte Verschiebung der einzelnen Segmente. Während die Produktion von Mittelklassewagen in den letzten 3 Jahren sank, steigerte sich die Produktion von Oberklassewagen leicht. Die Produktion von Kleinwagen ging Ende der 1990er Jahre leicht zurück, zog in den letzten 2 Jahren aber wieder leicht an. Für das Jahr 2000, welches für das vorliegende Paper als Betrachtungszeitraum gewählt wurde, betrug der Anteil von Kleinwagen 8,7%, von Mittelklassewagen 71,8% und der von Oberklassewagen 19,5% an der Gesamtproduktion (ohne Cabriolets, Vans und Utilities). Insgesamt wurden im Jahr 2000 4.667.908 Klein-, Mittelklasse und Oberklassewagen hergestellt. Diese decken ca. 91% der gesamten Produktion von Personenkraftwagen (inkl. Cabriolets, Vans und Utilities) im Jahr 2000 ab.

Abb. 3: Produktion von Pkw nach Segmenten (1996-2004)

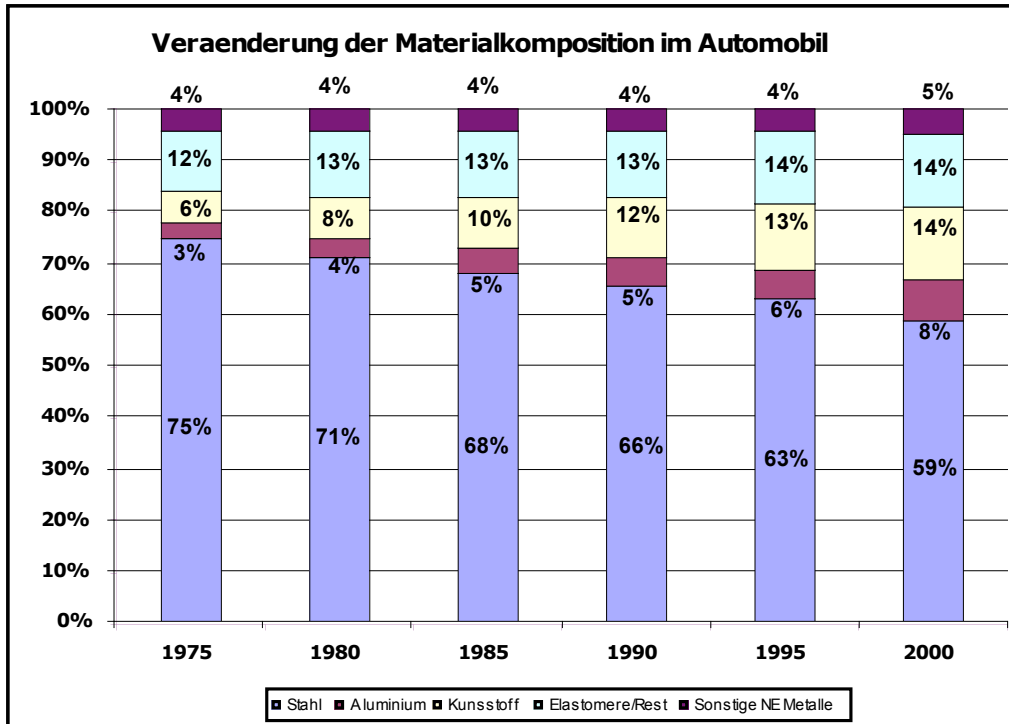


Quelle: VDA (2005)

3.2 Beschreibung und Trends der Materialkomposition des Produktes Pkw

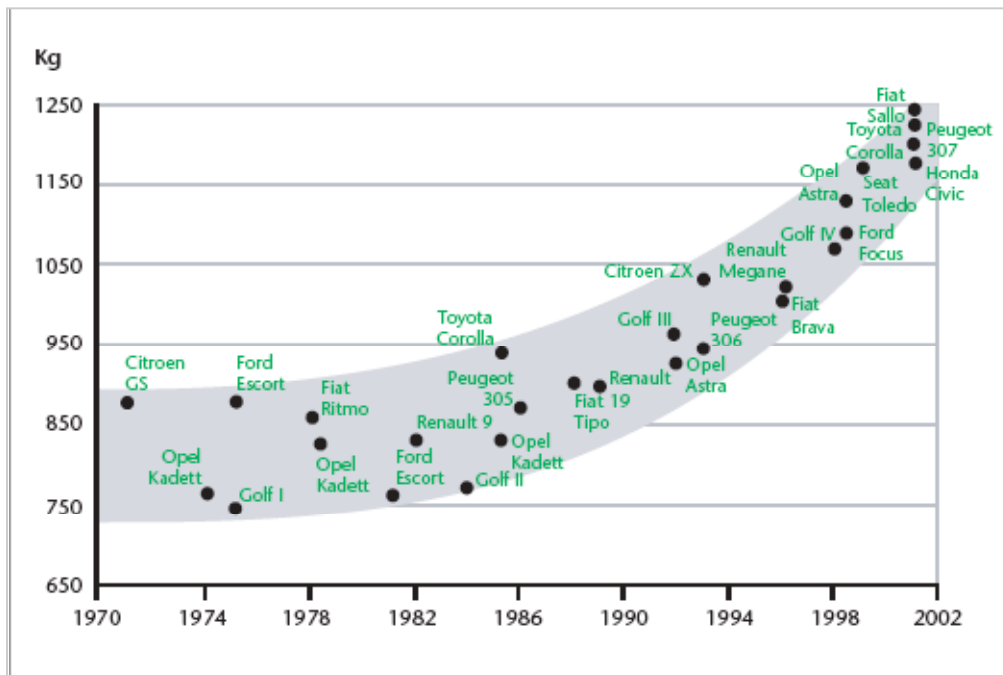
Die Materialzusammensetzung von Automobilen ist sehr komplex. So besteht ein BMW zum Beispiel aus über 20.000 Einzelteilen (BMW Group, 2002). Die Hauptwerkstoffkomponenten von Automobilen sind in Abb. 4 dargestellt. Nach wie vor dominiert die Kategorie Stahl mit durchschnittlich ca. 59% Gewichtsanteil. Zwar hat sich die durchschnittliche Werkstoffkomposition innerhalb der letzten 30 Jahre zu Gunsten von leichteren Materialien (insbesondere Aluminium und Kunststoffe) verschoben (siehe Abb. 4). Allerdings stieg das Leergewicht der Pkw innerhalb desselben Zeitraums von ca. 900 kg auf 1.120 kg (Jochem et al., 2004; VKE, 1998). Dieser Trend ist auch in Abb. 5 veranschaulicht, welche das Gewicht verschiedener Automobilmodelle über die Zeit vergleicht. Gründe für die sich beschleunigende Gewichtszunahme liegen vor allem in der steigenden Komfort- und Sicherheitsausstattung sowie in dem Anstieg der durchschnittlichen Motorleistung (Altmann et al., 2002; Jochem et al., 2004; WBCSD, 2005).

Abb. 4: Veränderung der Materialkomposition im Automobil



Quelle: Jochem et al, (2004), VKE (1998)

Abb. 5: Leergewichte verschiedener Pkw von 1970-2002



Quelle: WBCSD, (2005)

Die einzelnen Werkstoffe werden zum Teil für unterschiedliche Teile im Automobil verwendet, wie setzt (FNR, 2007).

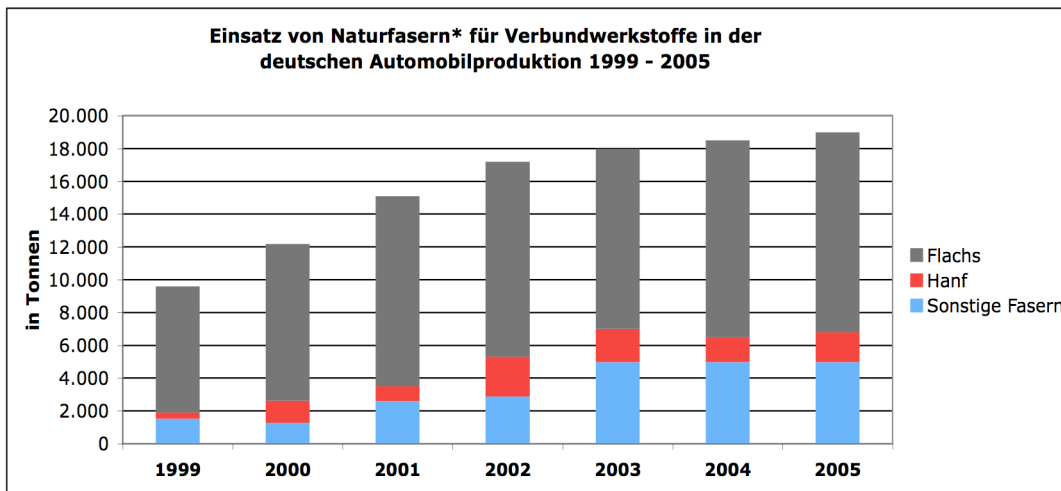
Tab. 1 zeigt. Stahl und Eisen werden hauptsächlich für die Karosserie, das Fahrwerk, den Motor und das Getriebe verwendet. Aluminium wird ebenfalls für die Karosseriestruktur, Türen, Klappen und Felgen, sowie für den Motorblock und den Zylinderkopf verwendet. Kunststoffe werden sowohl im Innenraum (Instrumententafel, Sitze, Verkleidungen, etc), im Außenraum (Stossfänger, Kühlergrill, Spiegelgehäuse, Stoßleisten etc) und im Motorraum sowie für die Elektrik (Behälter und Gehäuse für z.B. Kühlwasser und Batterie, Kabelisolierungen, elektronische Bauelemente etc) eingesetzt. Kupfer findet seine Hauptanwendung im Bereich der Elektronik (elektrische Zuleitungen, Elektromotoren etc). Blei wird überwiegend für Starterbatterien; Sondermetalle (Platin, Rhodium) hauptsächlich für Autoabgaskatalysatoren angewandt. Nachwachsende Rohstoffe kommen in der Automobilproduktion in Form von Flachs, Hanf, exotischen Fasern - wie Jute, Kenaf, Sisal und Abaca- sowie Holzfasern und Baumwolle zum Einsatz (Karus et al., 2006). Sie werden hauptsächlich im Fahrzeuginnenraum verwendet, zum Beispiel für Türinnenverkleidungen, Kofferraumauskleidungen, Hutablagen, Sitzpolsterungen oder für Dämmstoffe (Karus et al., 2004). Die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen im Automobilbau ist in den letzten Jahren angestiegen, wie Abb. 6 exemplarisch für den Einsatz von Naturfasern für Verbundwerkstoffe in der Automobilproduktion zeigt. Karus et al (2004) schätzt den durchschnittlichen Einsatz von Naturfasern für Verbundwerkstoffe in in Deutschland produzierten Automobilen auf 3.5 kg pro Pkw, in einzelnen Fahrzeugmodellen sogar auf bis zu 30 kg. Naturfasern werden dabei als Substitute für petrochemische Polymerwerkstoffe eingesetzt (FNR, 2007).

Tab. 1: Verwendung von Werkstoffen in verschiedenen Teilen des Automobils

Material	Verwendung
Stahl/Eisen	Karosserie (inkl. Türen etc.), Fahrwerk + Felgen, Motor (Kurbelgehäuse, Kurbelwelle, Nockenwelle), Getriebe
Leichtmetalle	
Aluminium	Karosseriestruktur, Motorblock, Zylinderkopf, Getriebegehäuse, Türen, Klappen und Felgen.
Magnesium	Heckklappe, Sitzgestelle, Instrumententräger am Armaturenbrett, Lenkrad
Buntmetalle	
Blei	Überwiegend in der Starterbatterie
Kupfer	Kabelbaum, Lichtmaschine, Unterhaltungselektronik, Bordcomputer, Elektromotoren
Sondermetalle	
Platin/Rhodium	Katalysatoren, Lamdasonden, Langzeit-Zündkerzen
Polymerwerkstoffe	
Kunststoffe	Innenraum (Armaturenbrett, Lenkrad, Sitzpolster und Bezüge, Ablagen, Kopfstützen, Verkleidungen) Außen (Radblenden, Spiegelgehäuse, Stoßfänger, Heckleuchten, Kühlergrill), Motorraum und Elektrik/Licht (Gehäuse und Behälter aus Kunststoff, elektronische Bauelemente und Kabelisolierungen)
Sonstige Werkstoffe	
Naturstoffe	Fußmatten, Sitze, Bezüge, Hutablagen etc.
Glas	Fensterscheiben, Spiegel, Glasdächer, etc.
Elektronik/Elektrik	Innenausstattung, Lichtmaschine, Displays, etc.

Quelle: Ostertag (pers comm.); Schweimer (1998); Niesing (2004); Steuff and Klassert (2007); VKE (1998); Thielen (2007); Schuh (no date); ThyssenKrupp Stahl (1999), Hagelüken (2005), Karus et al (2006)

Abb. 6: Einsatz von Naturfasern für Verbundwerkstoffe in der deutschen Automobilproduktion



Quelle: Karus et al. (2006)

*ohne Holz und Baumwolle

Die Tabelle verdeutlicht auch, dass auf Grund der verschiedenen Anwendungsfelder der einzelnen Werkstoffe Ersatzpotenziale durch Werkstoffsubstitution limitiert sind.

3.3 Methodik zur Berechnung des Ressourcenverbrauchs

3.3.1 Datenbasis

Um Daten über die mit der Herstellung von Personenkraftfahrzeugen verbundenen Materialströme zu erhalten, wurde zunächst eine Internet-, Daten- und Literaturrecherche durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass zwar eine Reihe von Automobilkonzernen grob strukturierte Daten zur Materialkomposition einzelner Modelle veröffentlichen. Diese Daten geben jedoch nur Aufschluss über die in dem Endprodukt enthaltene Menge von Materialien, nicht jedoch über die tatsächliche Menge von Ressourcen, die über den gesamten Lebenszyklus des Produktes verwendet werden. Weitergehende Recherchen, insbesondere das Screening von Umweltberichten, Nachhaltigkeitsberichten und relevanten Webseiten von Autokonzernen ergaben jedoch, dass die meisten Autokonzerne Sachbilanzen oder ähnliche Instrumente (z.B. Design for Environment) anwenden und somit über detaillierte Angaben zur tatsächlichen Menge der eingesetzten Ressourcen entlang des Lebenszyklus für einige Modelle verfügen sollten.

In einem zweiten Schritt wurden daher die Automobilkonzerne direkt kontaktiert und um ausführlichere Informationen in Form von Sachbilanzen verschiedener Autotypen gebeten.

Hinreichend ausführliche Informationen konnten jedoch nur für eine relativ kleine Anzahl von Autos bezogen werden. Ausführliche Sachbilanzen lagen demnach nur für den Seat Ibiza, den VW Golf A4 und den VW Lupo vor. Für die Mercedes S-Klasse lag zwar ebenfalls eine Ökobilanz vor, diese ist jedoch längst nicht so detailliert, wie die

der anderen Automodelle und konnte demnach nur unter Verwendung weiterer vereinfachender Annahmen verwendet werden. Dennoch decken die vorhandenen Sachbilanzen der Automodelle ein breites Spektrum von Autoklassen ab, wie Tab. 2 zeigt. Um eine erste grobe Abschätzung für die Ressourcenintensität der verschiedenen Autoklassen durchzuführen, wurde daher für die Hochrechnung angenommen, dass diese Autotypen repräsentativ für ihre jeweiligen Klassen sind. Der Golf und die Mercedes S-Klasse führen innerhalb der Segmente „Kompaktklasse“ und „Oberklasse“ des KBA regelmäßig die Statistik der zulassungstärksten Personenkraftwagen an (KBA, 2006). Da die einzelnen Segmente des KBA hier jedoch in 3 Klassen zusammengeführt wurden, können der Golf und die Mercedes S-Klasse als eingeschränkt repräsentativ betrachtet werden. Der Seat Ibiza ist strikt genommen kein deutsches Auto und wird nicht in Deutschland sondern Spanien produziert. Aufgrund der vorliegenden Sachbilanz soll der Seat Ibiza hier jedoch als Repräsentant für einen in Deutschland produzierten Kleinwagen herangezogen werden. Auch wird der für die Produktion des Seat Ibiza benötigte Strom in Schweimer et al (1999) als Strom-Mix BRD bilanziert, was eine Vergleichbarkeit mit den anderen Sachbilanzen ermöglicht.

Tab. 2: Autoklassen in der Automobilindustrie

Autoklasse	Kleinwagen	Mittelklasse	Oberklasse
Beispielmodelle	SEAT Ibiza (konventionell) VW Lupo 3L (Leichtbau)	VW Golf A4	Mercedes S-Klasse

3.3.2 Berechnung des Ressourcenverbrauches (TMR) für die einzelnen Autoklassen

Die drei Sachbilanzen der Volkswagengruppe zu Seat Ibiza (Schweimer, 1998), VW Lupo (Schweimer et al., 1999) und VW Golf A4 (Schweimer et al., 2005) sind ähnlich aufgebaut und können daher relativ gut miteinander verglichen werden. Sie bilanzieren technische Flüsse für eine Vielzahl von Materialien und unterscheiden zwischen der Produktions-, Nutzungs- und Verwertungsphase. Wie bereits oben angedeutet, gibt die Studie des Mercedes S-Klasse keine detaillierten Informationen über den Einsatz spezifischer Materialien. Ausführliche Informationen werden hauptsächlich für Emissionen, Treibhauspotenzial, Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial, photochemisches Oxidantienbildungspotenzial und den Primärenergieverbrauch gegeben. Auch hier wird zwischen der Produktions-, Nutzungs- und Verwertungsphase unterschieden. Angaben zum Materialeinsatz werden nur in Form einer Werkstoffzusammensetzung gemacht, die nach der VDA 231-106 Klassifizierung gegliedert ist. Um größtmögliche Vergleichbarkeit zu erzielen und weitere Annahmen auf Basis der vorhandenen Sachbilanzen zur tatsächlichen Menge der eingesetzten Ressourcen für die S-Klasse zu treffen, wurden die in den Sachbilanzen angegebenen Materialien ebenfalls nach VDA-231-106 Klassifizierung gegliedert. Box 1 gibt einen Überblick über die VDA-Klassifizierung.

Box 1: Werkstoffklassifizierung im Automobil nach VDA 231-106

Die VDA 231-106 differenziert zwischen folgenden Gruppen:

1. Stahl und Eisenwerkstoffe
2. Leichtmetalle, Guß und Knetlegierungen
3. Buntmetalle, Guß- und Knetlegierungen
4. Sondermetalle
5. Polymerwerkstoffe
6. Prozesspolymere
7. Sonstige Werkstoffe und Werkstoffverbunde
8. Elektronik/Elektrik
9. Betriebsstoffe und Hilfsmittel

Auch kann die in den Sachbilanzen angegebene Menge der Materialien nicht als vollständig betrachtet werden, da sie nicht die indirekten Flüsse enthält (Ressourcenaufwand, Emissionen etc.), die mit der Produktion, Nutzung und Verwertung eines Autos verbunden sind. Um eine Abschätzung über den tatsächlichen Ressourcenverbrauch (TMR)² über den gesamten Lebenszyklus zu erhalten, wurden die in den Sachbilanzen aufgeführten Materialien mit Materialinputfaktoren verknüpft. Diese wurden vom Wuppertal Institut für eine Reihe von Stoffen erstellt³, auf die für das vorliegende Paper zurückgegriffen werden konnte. Materialien, für die kein Faktor vorlag bzw. mit realistischen Annahmen abgeschätzt werden konnte, wurden mit einem Faktor von „1“ verknüpft, um so zumindest das Eigengewicht des Materials mit einzubeziehen. Die in diesem Paper aufgeführten Daten des TMR sind daher als Mindestabschätzungen zu verstehen.

Für eine Reihe von Materialien mussten zusätzliche Annahmen getroffen werden. So haben die Sachbilanzen für den VW Golf A4, den Seat Ibiza und den VW Lupo zum Beispiel keine Angaben über den Einsatz von Sondermetallen wie Platin, Rhodium und Palladium, vermutlich weil die Menge der Metalle so gering ist, dass sie in den Bilanzen nicht extra aufgeführt wurden. Die Extraktion und Weiterverwendung von Platingruppenmetallen ist jedoch mit großen Mengen von Ressourcenextraktion und Schwefeldioxidemissionen verbunden, so dass selbst geringe Mengen nicht vernachlässigt werden sollten. Platingruppenmetalle werden hauptsächlich für Katalysatoren verwendet. Lamdasonden, die zur Regelung des Luft-Treibstoffverhältnisses bei Fahrzeugen mit geregelterm Dreiwegekatalysator benötigt werden (Hagelüken, 2005), enthalten ebenfalls PGM. Hagelüken (2005) gibt an, dass Fahrzeuge gegenwärtig durchschnitt-

² Der TMR (engl. Total Material Requirement) ist ein Indikator, der in der Materialflussanalyse verwendet wird. Er setzt sich aus dem Direktem Materialinput (inländische Rohstoffentnahme und Importe) und deren inländischen und ausländischen Rucksackflüssen zusammen.

³ Siehe auch www.mipsonline.de

lich 2 Lamdasonden enthalten. Langzeitzündkerzen, welche flächendeckend nur für die Oberklasse eingesetzt werden, sind ebenfalls mit Platin beschichtet (Hagelücken, 2005). Die Ecoinvent database gibt Platinangaben für den VW Golf A4, die auch für den Seat Ibiza verwendet wurden. Da der VW Lupo ein Dieselfahrzeug ist und folglich eine andere Art von Katalysator enthält als Seat Ibiza und VW Golf A4, wurde die Menge von Platin nach Hagelücken abgeschätzt. Hagelücken (2005) spezifiziert den Platingruppengehalt von Diesel und Ottomotorkatalysatoren nach Euro-Abgasnorm und Hubraum. Der VW Lupo erfüllte schon zu Beginn seiner Produktion im Jahr 1999 die ab dem Jahr 2005 geltende Euro-Abgasnorm IV.

Die Materialkomposition des Mercedes S-Klasse gibt zwar eine Kategorie Sondermetalle an, diese ist jedoch mit 360 g zu groß, als dass sie nur PGM enthalten könnte. Der Platingruppengehalt in Katalysatoren sowie in den Lamdasonden und Zündkerzen wurde folglich nach Hagelücken (2005) abgeschätzt. Für den restlichen Anteil der Sondermetalle konnte wegen fehlender Spezifikationen kein MI Faktor verwendet werden, es wurde daher nur das Eigengewicht mit eingerechnet.

Auch geben nicht alle Sachbilanzen detaillierte Angaben zu dem Einsatz von Sekundärmaterialien. Für Aluminium wird die Menge an eingesetztem Sekundärmaterial zwar in den Sachbilanzen für VW Golf A4, Seat Ibiza und VW Lupo angegeben, jedoch zum Beispiel nicht für Kupfer. Die Studie der Mercedes S-Klasse enthält gar keine Spezifizierung von Primär- und Sekundärmaterialien. Allerdings enthalten alle Studien Angaben zu der Menge an anfallenden Erzen, z.T. sogar mit der Konzentration der enthaltenen Metalle, so dass die Menge der eingesetzten Primärmaterialien berechnet werden konnte. Für die S-Klasse wurde derselbe Erzgehalt für Aluminium angenommen, der bei dem VW Golf A4 angegeben ist. Der Anteil von Kupfer wurde berechnet, indem der mittlere Cu-Gehalt der Erze (Welt) mit 0,99% nach Krauss et al. (1999) angenommen wurde. Auch fehlen in den Sachbilanzen von VW Golf A4, Seat Ibiza und VW Lupo Angaben zu den Mengen an eingesetztem Sekundärstahl (Elektrostahl). Altmann et al. (2002) geben an, dass etwa 80% des im Automobilbau eingesetzten Stahls aus der Oxygenstahlproduktion und 20% aus Elektrostahl stammen. Diese Annahme wurde für alle Autos übernommen.

Um den TMR für die S-Klasse zu berechnen, mussten ebenfalls weitere vereinfachende Annahmen getroffen werden. Wie bereits erwähnt, gibt die Materialkomposition zwar verschiedene Kategorien an (wie z.B. Stahl/Eisen, Buntmetalle etc.), jedoch keine weitere Spezifikation nach den verschiedenen Materialien, die in den einzelnen Kategorien enthalten sind. Um dennoch einen möglichst spezifischen TMR für die einzelnen Kategorien zu bilden, wurde angenommen, dass sich die Kategorien ähnlich zusammensetzen wie die der anderen Fahrzeuge. Es wurde daher auf den Mittelwert der anderen Sachbilanzen zurückgegriffen, um den Anteil der spezifischen Materialien in den einzelnen Kategorien für die S-Klasse zu ermitteln. Für einige andere Materialien werden für die S-Klasse allerdings sehr spezifische Angaben gemacht. So wird der Einsatz von rezykliertem Kunststoff zum Beispiel mit 21,2 kg angegeben, der von nachwachsenden Rohstoffen mit 43 kg. Mangels MIPS-Koeffizienten zu rezykliertem

Kunststoff wurde nur das Eigengewicht dieser Teile berücksichtigt. Für die nachwachsenden Rohstoffe wurden MIPS-Koeffizienten von Baumwolle und Faserplatte (Annahme 20:80) verwendet, da diese die Hauptanteile der nachwachsenden Rohstoffe in der S-Klasse auszumachen scheinen (DaimlerChrysler AG, 2005).

Um den tatsächlichen Einsatz von Ressourcen zu ermitteln, der für die Produktion anfällt, müssen neben der in dem Endprodukt enthaltenen Materialien ebenso die Menge von Verschnitt und Stromverbrauch eingerechnet werden, die bei der Produktion anfallen. Laut Expertenmitteilung kann man bei den Stahlkomponenten im Karosseriebau von einem durchschnittlichen Verschnitt von 40-50% ausgehen. Große Teile der Karosserie der Mercedes S-Klasse bestehen allerdings aus Aluminium (Motorhaube, Kotflügel, Türen, Rückwand, Kofferraumdeckel sowie Front und Heckmodule). Auch hier kann laut Expertenmeinung (EAA und GDA, zitiert in Paulus, 2005) von einem Verhältnis von 2:1 von Halbzeug zu Fertigteil ausgegangen werden. Daher wurde die Menge des Verschnittes für Aluminium auf 50% festgesetzt. Wie bereits oben erwähnt, sind in der Sachbilanz der S-Klasse Angaben zu der Menge an eingesetztem Bauxit, aus denen sich die Menge des eingesetzten Primäraluminiums errechnen lässt. Die Differenz zu der Gesamtmenge von Aluminium wurde folglich als Sekundäraluminium bilanziert. Für Stahl wurde der Verschnitt für den Anteil der Karosserie auf 50% angesetzt, der Restanteil hypothetisch mit 20%. Um die Menge des Verschnittes der übrigen Materialien zu berechnen, wurde wieder auf die detaillierten Sachbilanzen der anderen drei Fahrzeuge zurückgegriffen und Durchschnittswerte gebildet.

Auch fehlen in der Sachbilanz der Mercedes S-Klasse spezifische Angaben zum Energieverbrauch während der Produktion (z.B. in Form von elektrischer und thermischer Energie, Gas etc). Es wurde daher angenommen, dass der Energieverbrauch während der Produktion von der Masse des produzierten Fahrzeuges abhängt. Der bei der Produktion der Mercedes S-Klasse anfallende Verbrauch von elektrischer Energie und Gas wurde daher auf der Basis des am Fahrzeuggewicht gewichteten Mittelwertes der drei Sachbilanzen der Volkswagen AG abgeschätzt. Für thermische Energie wurde der einfache Mittelwert zu Grunde gelegt, da angenommen wurde, dass dieser nicht vom Fahrzeuggewicht abhängt.

Für die anderen Fahrzeuge werden Angaben über Stromverbrauch und den Einsatz anderer Energieträger in der Sachbilanz gemacht. Für die thermische Energie wurde nach Gernuks (2005) angenommen, dass sich diese zu 31% aus Erdgas, 6,7% aus Braunkohle, 61,5% aus Steinkohle sowie 0,7% aus Heizöl zusammensetzt.

Angaben zum Transport finden sich ebenfalls in den Sachbilanzen der Volkswagen AG. Allerdings beziehen sich diese nur auf die Auslieferung der produzierten Fahrzeuge, nicht jedoch auf die Anlieferung von Werkstoffen an das Werk. Gernuks (2005) gibt durchschnittliche Angaben für die an das Werk Wolfsburg (Volkswagen) per LKW und Bahn gelieferten Materialmengen an. Dadurch lassen sich für Bahn und LKW Tonnenkilometer pro Fahrzeug ermitteln. Dieser – wenn auch grobe – Durchschnittswert wurde jeweils für den Seat Ibiza, VW Golf A4 und VW Lupo angenommen. Das Transport-

volumen für die Mercedes S-Klasse wurde durch den am Fahrzeuggewicht gewichteten Mittelwert berechnet.

Für die Nutzungsphase spielen der Öl-, Diesel- und Benzinverbrauch der jeweiligen Autotypen eine wesentliche Rolle. Für den Benzinverbrauch finden sich in allen 4 Studien Angaben. Allerdings wird die Lebensdauer von Seat Ibiza, VW Golf A4 und VW Lupo in den jeweiligen Sachbilanzen mit 10 Jahren und 150.000 km angegeben, während die Umweltbilanz der Mercedes S-Klasse eine Laufzeit von 300.000 km (ohne Altersangaben) zu Grunde gelegt wird. Diese Angaben stammen wie gesagt aus den jeweiligen Sachbilanzen und stimmen nicht unbedingt mit tatsächlichen Laufzeiten überein. Zwecks Vergleichbarkeit wird der Ressourcenaufwand der verschiedenen Fahrzeuge zunächst auf Basis einer Laufleistung von 150.000 km berechnet (siehe auch Tab. 4). Gleichzeitig wird der Ressourcenverbrauch, der mit der Mercedes S-Klasse verbunden ist, auch für eine Laufzeit von 300.000 km (wie in der Umweltbilanz angegeben) berechnet.

Die Auswirkung einer Erhöhung der Laufleistung wird jedoch an verschiedenen Stellen näher beleuchtet. Die Angaben bezüglich des Kraftstoffverbrauches basieren auf der EG-Richtlinie 80/1268/EWG in der Fassung 93/116/EWG. Dies macht die Angaben vergleichbar, aber Kritiker wie z.B. der ADAC bestreiten, dass diese Verbrauchszahlen dem realen Nutzerverhalten entsprechen. Auch ist das Potenzial bei höher motorisierten Fahrzeugen, den Kraftstoffverbrauch durch die Fahrweisen nach oben zu treiben, hoch. So ermittelt der ADAC den Kraftstoffverbrauch bei eigenen Tests mit einer differenzierten Methode. Tabelle 3 vergleicht die Kraftstoffverbräuche laut Herstellerangaben und europäischem Normzyklus bzw. laut ADAC beispielhaft für den Golf A4 und die Mercedes S-Klasse. Wie die Tabelle zeigt, liegt der Kraftstoffverbrauch laut ADAC für beide Modelle deutlich höher. Der auf der Basis der Herstellerangaben ermittelte Ressourcenverbrauch in der Nutzungsphase ist daher als Mindestabschätzung zu verstehen.

Tab. 3: Kraftstoffverbrauch nach verschiedenen Methoden

Pkw	Kraftstoffverbrauch laut Hersteller und europäischem Normzyklus	Kraftstoffverbrauch laut ADAC
Golf A4 1,4 55Kw Benzin	6,5 l	8,1 l
Golf A4 1,9 TDI 66kW	4,9 l	5,9 l
Mercedes S 350 Benzin	10,1l – 10,3 l	11,9 l

Der Ölverbrauch wurde aus den Angaben der Sachbilanzen von VW Golf A4, Seat Ibiza und VW Lupo pro km berechnet und dementsprechend auf die verschiedenen Laufzeiten der S-Klasse übertragen. Die anderen Materialien, die während der Nutzungsphase anfallen (Verbrauchsteile, Wartungen), wurden für die S-Klasse berechnet, in dem der gewichtete Mittelwert der Volkswagen Sachbilanzen unter Berücksichtigung des Gesamtfahrzeuggewichtes zu Grunde gelegt wurde.

3.4 Ergebnisse

3.4.1 Ressourcenverbrauch

Tab. 4 zeigt den TMR für die verschiedenen Autotypen. Der TMR ist für die Produktion und die Nutzung getrennt ausgewiesen. Auch wird der Energieanteil, der in der Produktion und Nutzung anfällt, getrennt dargestellt. Der Benzin-, Diesel- und Ölverbrauch ist allerdings in der Nutzung enthalten.

Es zeigt sich, dass der Strom- und Energieverbrauch während der Produktion deutlich zu Buche schlägt. Die Nutzungsphase (dominiert durch den Öl-, Diesel- und Benzinverbrauch) hat ebenfalls einen beachtlichen Anteil am Gesamt-TMR. Allerdings ist der Anteil der Nutzungsphase (u.a. bedingt durch den Treibstoffverbrauch) für die einzelnen Fahrzeuge verschieden. Obwohl die Nutzungsphase mit 300.000 km bei der Mercedes S-Klasse nach Herstellerangaben doppelt so lang ist wie die von Seat Ibiza, VW Lupo und VW Golf A4, beziehen sich die Angaben der Mercedes S-Klasse in dieser Tabelle ebenfalls auf eine Laufleistung auf 150.000 km, um so eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Autotypen herzustellen. Bei einer höheren Laufleistung würden durch den damit verbundenen größeren Benzin-, Diesel und Ölverbrauch die TMR Werte in der Nutzungsphase steigen, während die Werte für die Produktion unverändert bleiben würden (siehe auch Abschnitt 4.4.1.)

Tab. 4: TMR verschiedener Autotypen gesamt

TMR (kg)	Seat Ibiza	VW Lupo (3L)	VW Golf A4 (Otto)	Mercedes S350
PRODUKTION				
Werkstoffe	9.334	11.445	10.617	25.346
Sonstige Produktion	180	137	285	265
Energie	8.539	8.039	10.887	16.972
Elektrische Energie	7.877	7.426	10.053	16.223
Thermische Energie	622	565	773	654
Erdgas	40	48	60	95
Transport	280	272	283	540
Zulieferung	245	245	245	477
Auslieferung	35	27	38	63
Summe Produktion	18.332	19.892	22.072	43.122
NUTZUNG				
Fahrbetrieb (inkl. Benzin-, Diesel- und Ölverbrauch und Wartungen)	11.906	6.993	11.598	17.889
Energie	1.105	762	1.084	1.103
Elektrische Energie	1.058	752	1.039	1.058
Thermische Energie	34	-	31	31
Erdgas	15	10	15	15
Summe Nutzung	13.012	7.755	12.682	18.992
GESAMT	31.345	27.648	34.755	62.114
Anteil TMR Produktion am Gesamt TMR	58%	72%	64%	69%
Anteil TMR Nutzung am Gesamt TMR	42%	28%	36%	31%

Vergleicht man den TMR zwischen den einzelnen Autotypen, so zeigen sich zwischen dem Seat Ibiza, dem VW Golf A4 und dem VW Lupo nur geringe Unterschiede. Der VW Lupo schneidet am besten ab, gefolgt von Seat Ibiza, VW Golf A4 und Mercedes S-Klasse. Auffallend sind jedoch die Unterschiede in der Produktions- und Nutzungsphase. In der Produktionsphase hat der VW Lupo einen höheren TMR als der Seat Ibiza, was unter anderem mit dem höheren Anteil an Aluminium und den größeren Mengen von Platingruppenmetallen zusammenhängt. In der Nutzungsphase dagegen

ist der TMR des VW Lupo im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen auf Grund seines geringen Treibstoffverbrauchs wesentlich niedriger. Insgesamt kompensiert der geringere TMR in der Nutzungsphase damit den höheren TMR in der Produktion. Der Seat Ibiza hat in der Produktionsphase den niedrigsten TMR, der TMR in der Nutzungsphase ist auf Grund des höheren Treibstoffverbrauches höher als der des VW Golf A4's. Die Mercedes S-Klasse hat sowohl in der Produktions- als auch in der Nutzungsphase den höchsten TMR.

Bezieht man allerdings die in der Umweltbilanz der Mercedes S-Klasse angegebene Laufzeit von 300.000 km mit ein und vergleicht den TMR pro 100 km, so reduziert sich der Unterschied zwischen der Mercedes S-Klasse und den anderen Fahrzeugen, auch wenn die Mercedes S-Klasse noch immer den höchsten TMR pro 100 km verzeichnet (siehe Tab. 5) Dies verdeutlicht den Einfluss, den die Lebensdauer auf die Ressourcenintensität einzelner Produkte hat.

Tab. 5: TMR verschiedener Autotypen pro gefahrene 100 km

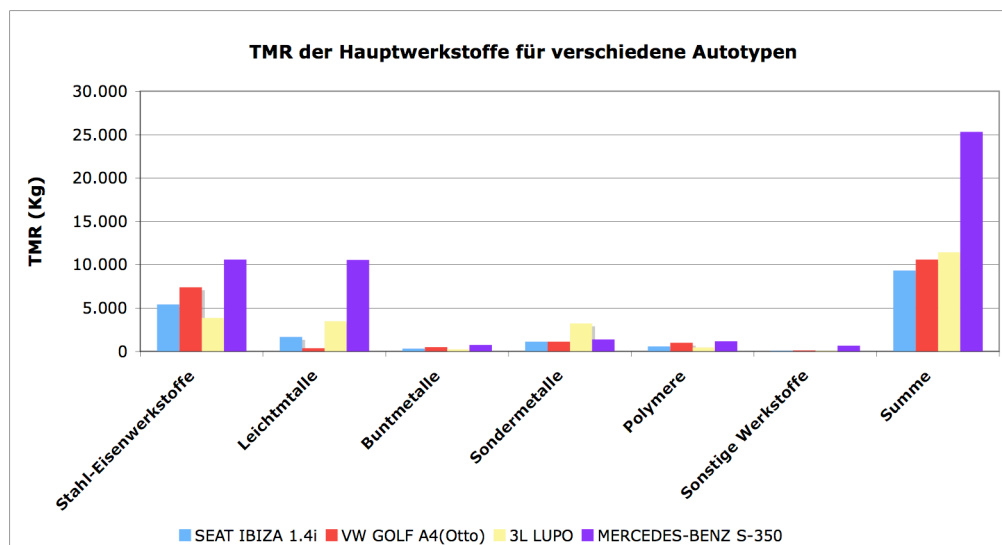
	Seat Ibiza	VW Lupo (3L)	VW Golf A4	Mercedes S350
Laufleistung laut Herstellerangaben (km)	150.000	150.000	150.000	300.000
TMR (kg) pro 100 km	20,90	18,4	23,17	27,04

Abb. 7 vergleicht den TMR der Hauptmaterialkategorien, die in Tab. 4 unter dem Begriff Werkstoffe zusammengefasst sind⁴. Erfasst werden somit nur die während der Produktion anfallenden Materialien und deren Rucksäcke. Innerhalb der einzelnen Materialkategorien dominiert die Kategorie Stahl und Eisen, was auf die Menge der eingesetzten Materialien zurückzuführen ist (ca. 50-65% des Fahrzeugleergewichtes). Der TMR der Leichtmetalle ist ebenfalls für den VW Lupo und die Mercedes S-Klasse recht hoch. Dies hängt zum einen damit zusammen, dass der Anteil an Leichtmetallen in diesen beiden Fahrzeugen mit jeweils 16% des Fahrzeuggewichtes höher ist, als der vom Seat Ibiza und dem VW Golf A4 (je 3% und 5%). Auch spielt der Einsatz von Primär- vs. Sekundäraluminium eine große Rolle. Für den VW Lupo beträgt der Anteil von Primär- zu Sekundäraluminium zum Beispiel 50:50, während der VW Golf A4 nur einen Primäraluminiumanteil von 10% hat. Der Anteil von Primär- und Sekundäraluminium für den S-Klasse Mercedes wurde auf Basis der angegebenen Menge des Bauxit und dem angenommenen Verschnitt auf 44:56 Primär- zu Sekundär geschätzt. Theoretisch

⁴ Die Kategorie Elektronik wird nur für die Mercedes S-Klasse explizit dargestellt, da die elektronischen Teile für die anderen Autotypen gemäß ihrer Materialkomposition eingegliedert wurden. Bei der Mercedes S-Klasse enthält die Kategorie Elektronik nur den Anteil der Leiterplatten. Der Anteil der Betriebsstoffe ist deswegen so gering, da davon ausgegangen wurde, dass das fertige Endprodukt Auto noch nicht betankt wurde.

ergeben sich hier also Potenziale der Ressourceneinsparung, indem man den Anteil von Sekundäraluminium erhöht. Allerdings ist zu prüfen, ob dies nicht mit Qualitätseinbußen verbunden ist oder technischen Richtlinien zum Beispiel für den Leichtbau widerspricht. Auch ist Verfügbarkeit von Aluminiumschrott ist begrenzt, solange die Menge des in Produkten verwendeten Metalls weiter steigt (dies gilt bislang für fast alle Metalle). Der TMR der Sondermetalle ist ebenfalls recht hoch, wenn man berücksichtigt, dass lediglich ein paar Gramm davon im Auto enthalten sind. Dies hängt mit den großen Mengen Bergbauabfälle zusammen, welche mit der Extraktion und Produktion von Platingruppenmetallen einhergehen. Auf Grund des Dieselskatalysators ist der Anteil der Sondermetalle für den VW Lupo recht hoch.

Abb. 7: TMR der im Auto eingesetzten Hauptwerkstoffe für verschiedene Autotypen



Quelle: eigene Berechnungen

3.4.2 Vergleich anderer ausgewählter Umweltparameter: Emissionen pro 100 Fahrzeugkilometer

Alle vier Sachbilanzen geben detaillierte Angaben zu Emissionen verschiedener Schadstoffe innerhalb der einzelnen Lebenszyklusphasen: Pkw-Herstellung, Kraftstoffherstellung, Fahrbetrieb/Nutzung und Verwertung. Wie allerdings bereits oben erwähnt, beziehen sich die Angaben auf unterschiedliche Laufleistungen (Mercedes S-Klasse 300.000 km, VW Golf A4, Seat Ibiza und VW Lupo: 150.000 km). Um dennoch sinnvolle Vergleiche zu ziehen, wurden die einzelnen Parameter auf 100 Fahrkilometer bezogen.

Abb. 8 zeigt die CO₂-Emissionen der verschiedenen Fahrzeugtypen innerhalb der verschiedenen Lebenszyklusphasen. Die meisten CO₂-Emissionen entstehen während der Nutzungsphase und sind stark vom Benzin-/Dieselverbrauch abhängig. Dies spiegelt sich auch innerhalb des Vergleiches der einzelnen Fahrzeugtypen nieder: Mit seinem Benzinverbrauch von 3 Litern pro 100 km stößt der VW Lupo innerhalb der Nut-

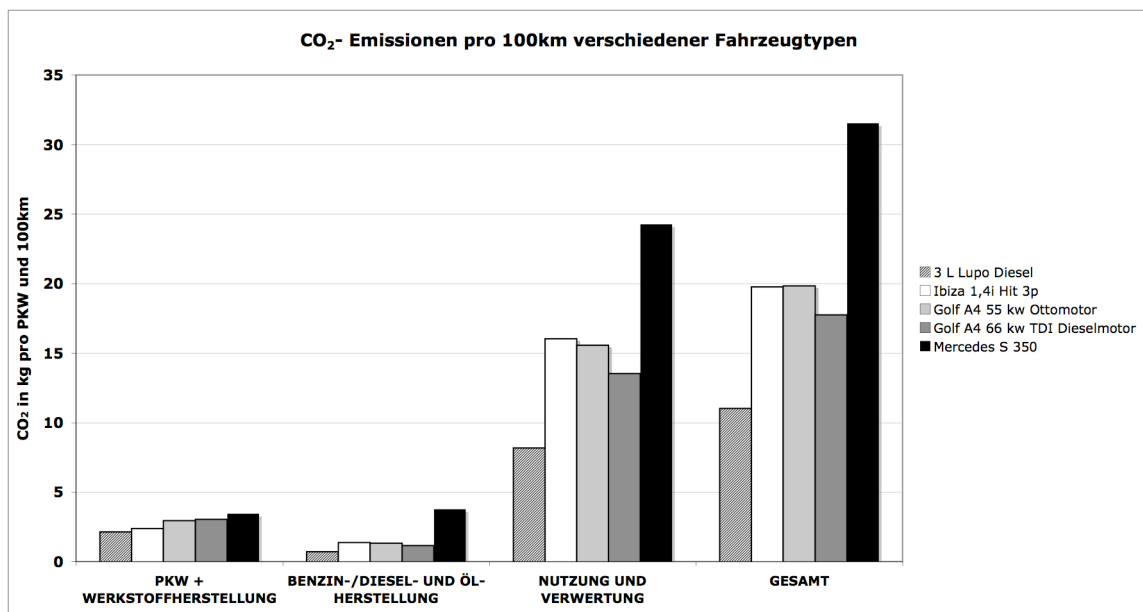
zungsphase am wenigsten CO₂ aus, während die Mercedes S-Klasse mit 10,1 l pro 100 km den höchsten CO₂-Ausstoß verzeichnet. Ähnliches trifft auch auf die Diesel- und Ölherstellung zu.

Im Gegensatz zu CO₂, werden die meisten SO₂-Emissionen während der Herstellung des Pkws und der Werkstoffe sowie bei der Kraftstoffherstellung freigesetzt und nicht während der Nutzungsphase. Auch hier sind die SO₂-Emissionen der Mercedes S-Klasse am höchsten (siehe

Abb. 9).

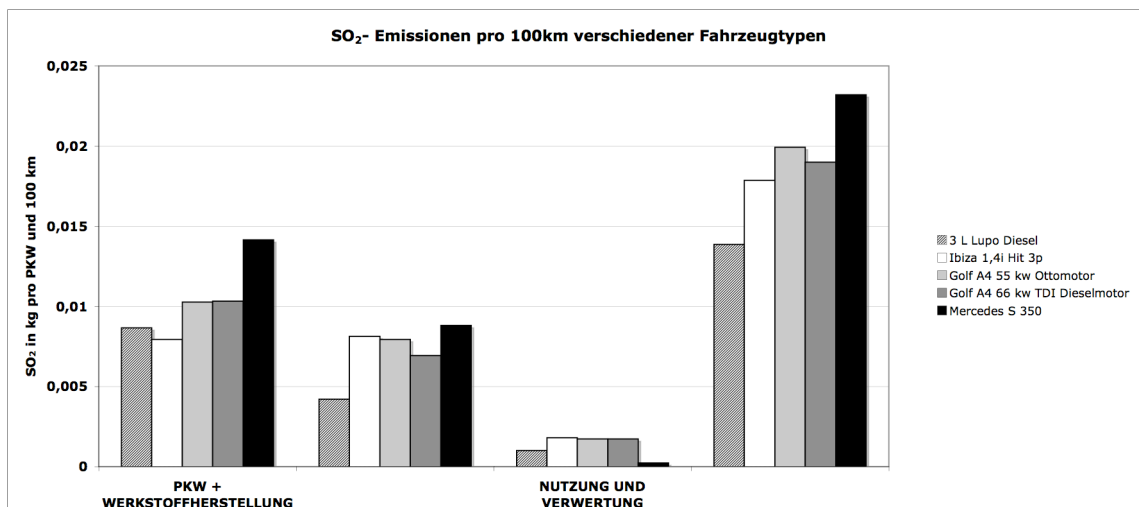
Bei den NO_x-Emissionen ist die Nutzungs- und Verwertungsphase von größter Bedeutung. NO_x-Emissionen sind für Dieselfahrzeuge generell sehr viel höher als für „Benziner“. Dies spiegelt sich auch in Abb. 10 wider und erklärt die hohen Werte für den VW Lupo und den VW Golf A4 (Diesel). Die relativ hohen Werte des Ibiza lassen sich damit erklären, dass der Sachbilanz der gesetzliche Grenzwert für den Abgastest zu Grunde gelegt wurde (Schweimer et al., 1999).

Abb. 8: CO₂-Emissionen in kg pro 100 km verschiedener Fahrzeugtypen



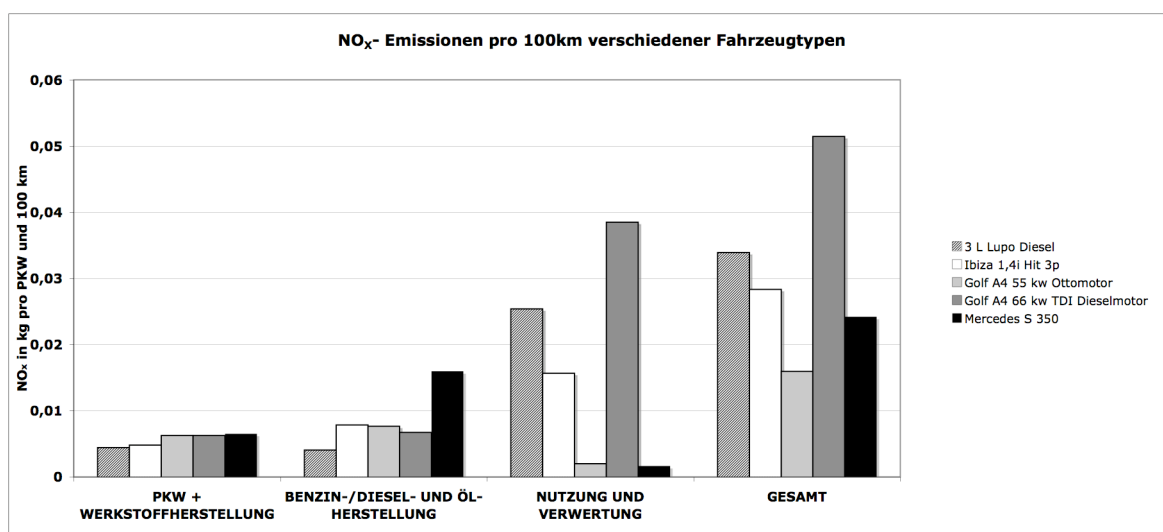
Quelle: eigene Berechnung

Abb. 9: SO₂-Emissionen in kg pro 100 km verschiedener Fahrzeugtypen



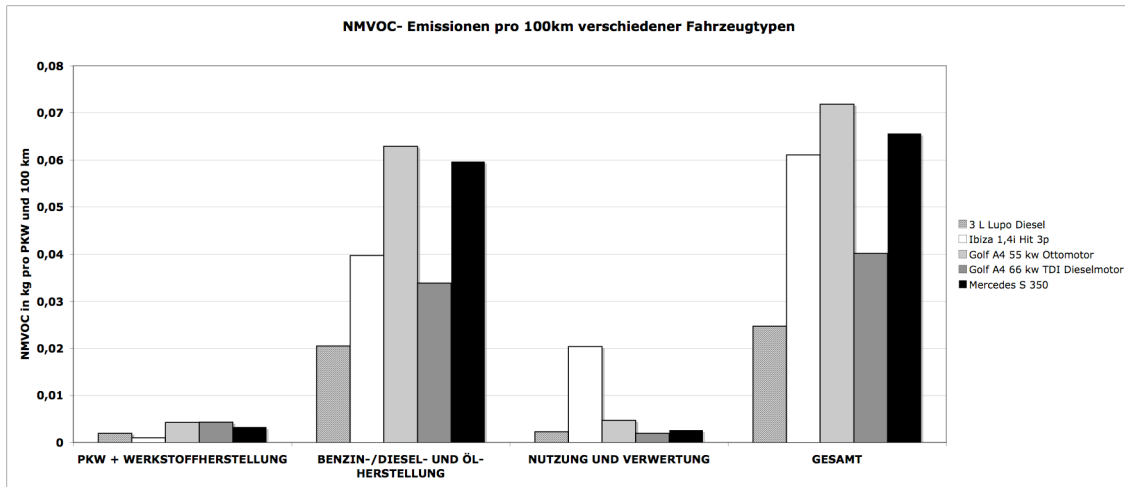
Quelle: eigene Berechnung

Abb. 10: NO_x-Emissionen in kg pro 100 km verschiedener Fahrzeugtypen



Quelle: eigene Berechnung

Abb. 11: NMVOC-Emissionen in kg pro 100 km verschiedener Fahrzeugtypen



Quelle: eigene Berechnung

Die größten NMVOC-Emissionen entstehen bei der Kraftstoffherstellung. Dabei wird bei der Herstellung von Diesel wesentlich weniger NMVOC freigesetzt als bei der Herstellung von Benzin (vgl. zum Beispiel VW Golf A4 Diesel und Otto Motor).

Tab. 6 zeigt die Zusammenfassung der Emissionen für die einzelnen Autotypen bezogen auf 100 km.

Tab. 6: Lebenszyklusweite Emissionen pro 100 km für verschiedene Fahrzeugtypen

	VW Seat Ibiza	VW Lupo	VW Golf A4	Mercedes S-Klasse
Laufleistung laut Hersteller (km)	150.000	150.000	150.000	300.000
CO₂ (kg/100 km)	19,8	11	19,8	31,53
SO₂ (kg/100 km)	0,018	0,014	0,020	0,023
NO_x (kg/100 km)	0,028	0,034	0,016	0,024
NMVOC (kg/100 km)	0,060	0,025	0,071	0,065

3.4.3 Schadstoffemissionen und Problemverlagerungen

Sowohl die Sachbilanzen des VW Golf A4, des Seat Ibiza als auch des VW Lupo geben an, dass „die Emissionen aus der Herstellung von Werkstoffen und Kraftstoffen ... zum großen Teil außerhalb von Europa (entstehen)“. Ähnliches ist auch für die Mercedes S-Klasse anzunehmen. Ein in Deutschland für den europäischen Markt erzeugtes Auto generiert damit Schadstoffe in anderen Teilen der Welt, ohne dass diese in irgendeiner Weise kompensiert würden: Ein klassisches Problem negativer Externalitäten. Dies trifft besonders für Umweltbelastungen im Bereich des Bergbaus und der Primärrohstoffproduktion zu, die durch den TMR reflektiert werden. Es gilt auch für SO₂

und NMVOC, die zu 81% bzw. 90%⁵ in der Werkstoff- und Kraftstoffherstellung emittiert werden, die zu einem erheblichen Teil im Ausland liegen.

Zu bedenken ist ferner, dass die Emissionen während der Nutzungsphase zum Großteil im Ausland stattfinden, da vier Fünftel der in Deutschland hergestellten Pkw exportiert werden. In gleicher Weise belasten die Importe ausländischer Hersteller, deren Produkte nach Deutschland importiert werden, die inländische Umwelt bzw. die inländische Umweltbilanz (im Fall von CO₂ sind die Auswirkungen global, aber die Allokation national). Eine Veränderung des lebenszyklusweiten Ressourcenaufwands und der Emissionsintensität der deutschen Pkw-Flotten-Produktion hätte somit vor allem eine direkte globale Entlastungswirkung und würde im Falle pionierhafter Neuentwicklungen über die Vorbildfunktion für andere Hersteller auch die inländisch wirksamen Umweltbelastungen vermindern.

3.4.4 Hochrechnung auf die Gesamtproduktion

Um den gesamten Materialverbrauch und TMR abzuschätzen, der mit der Produktion von Fahrzeugen in Deutschland verbunden ist, wurden die verschiedenen Wagentypen mit Produktionsdaten verknüpft. Angaben für die Produktion einzelner Autoklassen wurden der jährlichen Publikation „Tatsachen und Zahlen aus der Kraftverkehrswirtschaft“ des Verbandes der Automobilindustrie entnommen (VDA, 2005). Für die Berechnungen wurden die Segmente „Mini und Kleinwagen“ in die Kategorie „Kleinwagen“, „Untere Mittelklasse und Mittelklasse“ in die Kategorie „Mittelklasse“ und „Obere Mittelklasse, Oberklasse und Geländewagen“ in die Kategorie „Oberklasse“ zusammengefasst (siehe auch Abb. 3). Diese decken rund 91% der im Jahr 2000 produzierten Fahrzeuge ab. Die Kategorien Utilities, Vans und Cabriolets wurden nicht berücksichtigt. Wie zu Anfang erwähnt, wurde der Seat Ibiza als Repräsentant eines konventionellen Kleinwagens⁶, der VW Golf A4 für Mittelklassewagen und die S-Klasse für die Kategorie Oberklasse eingesetzt, um den Material- und Ressourcenverbrauch der Pkw-Produktion hochzurechnen.

Tab. 7 zeigt den reinen Materialverbrauch (ohne Rucksäcke und Energie) für die einzelnen Autoklassen und Materialkategorien für das Jahr 2000. Für die Produktion von Kleinwagen wurden demnach ca. 292.000 Tonnen Eisen und Stahl und 35.000 Tonnen Leichtmetalle verwendet. Für die Produktion von Oberklassewagen wurden dagegen ca. 1,3 Mio. Tonnen Stahl und Eisen eingesetzt. Die hohen Werte für die verschiedenen Materialien, die für die Produktion für Mittelklassewagen eingesetzt wurden, haben mit dem hohen Anteil dieser Klasse an der Gesamtproduktion (in 2000 ca. 71% aller produzierten Fahrzeuge) zu tun. Insgesamt ergaben sich damit u.a. 4,9 Mio. Tonnen Stahl und Eisen, 778.000 Leichtmetalle (davon 273.500 Tonnen Primär- und 500.000 Sekundäraluminium sowie 4.100 Tonnen Titan), 141.000 Tonnen Buntmetalle (wovon 1.360 Tonnen Primär-, und 54.000 Tonnen Sekundärkupfer sowie 70.000 Tonnen Blei,

⁵ Werte beziehen sich auf Angaben für den VW Golf A4.

⁶ Der VW Lupo wird in Abschnitt 4.2.3.1 getrennt behandelt.

6.000 Tonnen Nickel und 10.800 Tonnen Chrom) und 1,1 Mio. Tonnen Polymerwerkstoffe, die im Jahr 2000 in die Produktion von Klein-, Mittel- und Oberklassewagen flossen.

Um die Plausibilität dieser durch Bottom-up-Hochrechnung ermittelten Werte zu überprüfen, wurde versucht, diese mit Top-down-Daten zu vergleichen. Allerdings sind die von Wirtschaftsverbänden veröffentlichten Zahlen zu wenig spezifiziert, als dass sie für einen direkten Vergleich herangezogen werden könnten

Tab. 7: Hochrechnung des Materialverbrauches (ohne Rucksäcke und Energie) für die Produktion der einzelnen Autoklassen für das Jahr 2000 in 1000t

In 1000t	Kleinwagen (nach Typ Seat Ibiza)	Mittelklasse (nach Typ Golf A4 Otto-Motor)	Oberklasse (nach Typ Mercedes S350)	Gesamt
Stahl und Eisen	291,93	3.377,24	1.299,30	4.968,47
Leichtmetalle	34,97	215,57	526,98	777,52
Buntmetalle	9,20	90,13	41,31	140,64
Sondermetalle	0,00	0,01	0,01	0,01
Sonstige Sondermetalle	0,00	-	0,32	0,32
Polymerwerkstoffe	65,79	800,42	301,85	1.168,06
Prozesspolymere	1,52	38,53	10,21	50,26
Sonstige Werkstoffe und Werkstoffver-	8,63	110,23	62,25	181,11
Elektronik	-	-	2,14	2,14
Betriebsstoffe und Hilfsmittel	6,10	49,08	37,45	92,63
Gesamt	418,15	4.681,20	2.281,82	7.381,16

Tab. 8 zeigt den TMR für die einzelnen Kategorien sowie für den Energieanteil und sonstige Materialien, die für die Produktion verwendet werden. Demnach summiert sich der TMR, der jährlich für die Produktion von Klein-, Mittel-, und Oberklassewagen anfällt auf ca. 121 Mio. Tonnen. Das entspricht ca. 2% des gesamten TMR von Deutschland. In Teil1 des AP4 wurde der TMR für die Branche Kraftwagen und Kraftwagenteile mit 335 Mio. Tonnen errechnet. Dieser Wert beinhaltet jedoch außer der Pkw-Produktion auch noch die Produktion von Omnibussen, Lastkraftwagen etc. und die Herstellung von Teilen und Zubehör von Kraftwagen, was einen Teil der Differenz erklärt. Ein anderer Teil der Differenz lässt sich vermutlich durch methodische Unsi-

cherheiten erklären, da Bottom-up und Top-down-Verfahren häufig zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen.

Die Tabelle zeigt auch, dass der Anteil von Kleinwagen und Mittelklassewagen am TMR geringer ist als deren Anteil an der Produktion. Für die Oberklasse ist das Gegenteil der Fall. Eine Verschiebung von Mittel- und Oberklasse zu Gunsten von Kleinwagen bzw. eine Verlagerung des Materialeinsatzes in Mittel- und Oberklasse-Fahrzeugen könnte also eine Ressourceneinsparung bewirken. Dies wird in Abschnitt 4 näher untersucht.

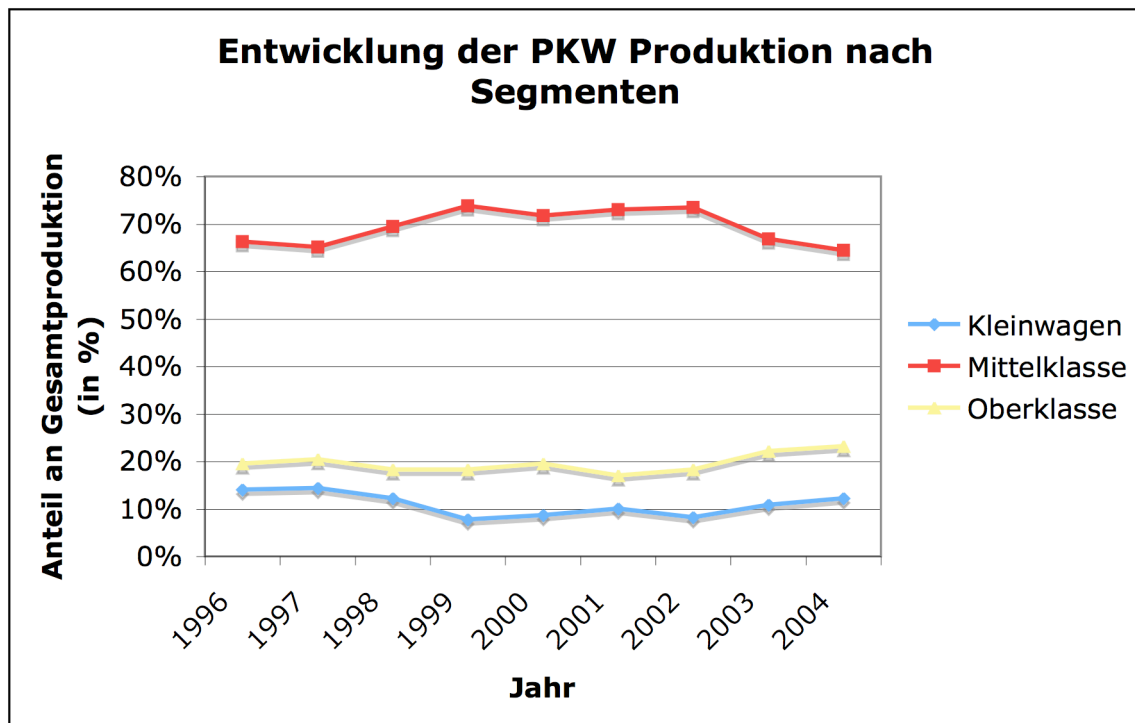
Tab. 8: TMR der Produktion nach Autoklassen in 1000t

in 1000t	Kleinwagen	Mittelklasse	Oberklasse	Gesamt
Stahl und Eisen	2.196,19	24.881,56	9.682,16	36.759,91
Leichtmetalle	687,42	1.205,21	9.626,25	11.518,88
Buntmetalle	141,43	1.724,39	705,60	2.571,42
Sondermetalle	455,24	3.764,79	1.253,85	5.473,88
Polymerwerkstoffe	238,82	3.356,20	1.090,62	4.685,65
Prozesspolymere	6,38	135,20	35,02	176,6
Sonstige Werkstoffe und Werkstoffver-	27,18	356,90	603,74	987,87
Elektronik		0,00	11,60	11,60
Betriebsstoffe und Hilfsmittel	28,84	148,50	114,77	292,12
Gesamt (Werkstoffe)	3.781,50	35.572,82	23.123,62	62.477,94
Sonstige Produktion	72,86	955,99	241,11	1.269,96
Energie (Produktion)	3.459,59	36.474,78	15.484,00	55.418,38
Transport	113,34	948,31	492,96	1.554,61
Gesamt TMR (Produktion)	7.427,30	73.951,90	39.341,69	120.720,688
Anteil an TMR (Produktion)	6,1%	61,3%	32,6%	100%
Anteil an Produktion	8,7%	71,8%	19,5%	100%

3.5 Ressourcenverbrauch der deutschen Automobilproduktion im Zeitverlauf

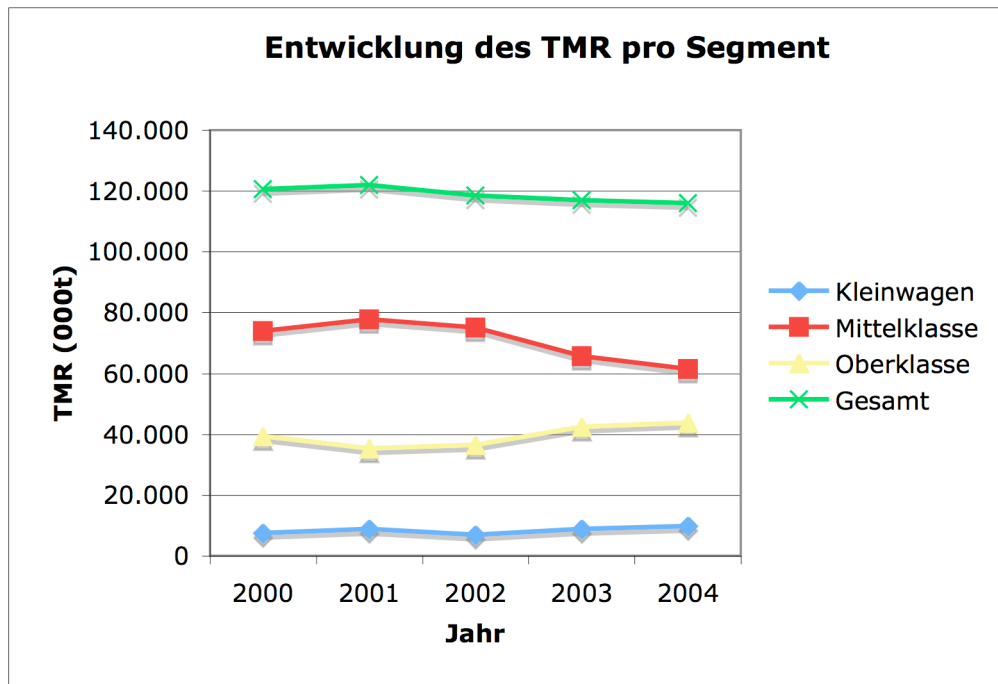
Abb. 12 zeigt die Produktionsanteile der einzelnen Segmente nach ihren prozentualen Anteilen der letzten Jahre. Wie die Abbildung zeigt, hat sich der Anteil der produzierten Kleinwagen und Oberklassewagen seit 2000 erhöht, während der Anteil der Mittelklassewagen insbesondere in den letzten 2 Jahren stark zurück gegangen ist. Dieser Trend spiegelt sich auch in den TMR-Daten wider, wie Abb. 13 zeigt. Allerdings ist die Anzahl der produzierten Wagen im gleichen Zeitraum (2000-2004) von 4,7 Mio. auf 4,4 Mio. zurückgegangen, hauptsächlich aufgrund eines Rückganges der produzierten Mittelklasse-Pkw. Die Reduzierung des TMR von ca. 121 Mio. Tonnen im Jahr 2000 auf 116 Mio. Tonnen im Jahr 2004 ist also hauptsächlich auf die Verringerung der produzierten Pkw zurückzuführen. Um den Einfluss der Verschiebung der einzelnen Segmente auf den TMR zu verdeutlichen, wurden in Abb. 14 die Menge der produzierten Pkw im Jahr 2000 konstant gehalten und die Produktionsanteile der einzelnen Klassen gemäß ihrer Entwicklung im Zeitraum von 2000-2004 variiert. Wie die Abb. 14 verdeutlicht, bewirkt der steigende Anteil der Oberklassenwagen trotz Rückgang des Anteils der Mittelklasse und Erhöhung des Kleinwagenanteils eine geringfügige Erhöhung des TMR.

Abb. 12: Entwicklung der Pkw-Produktion nach Segmenten



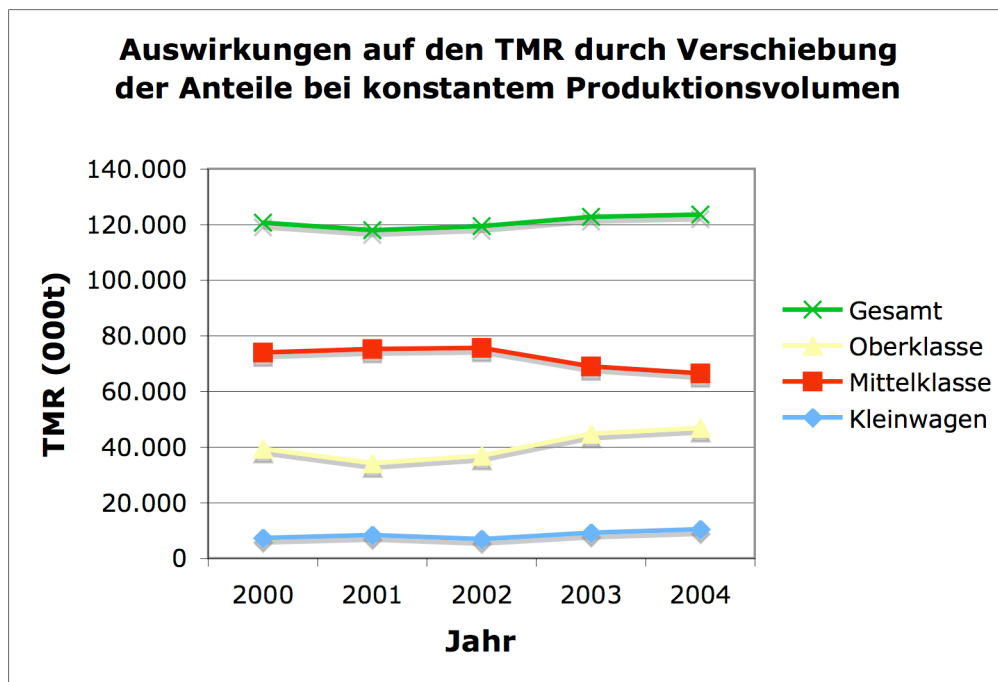
Quelle: VDA (2005)

Abb. 13: Entwicklung TMR (2000-2004)



Quelle: eigene Berechnung

Abb. 14: Verschiebung des Anteils der produzierten Segmente bei Konstanthaltung des Produktionsvolumens



Quelle: eigene Berechnung

4 Theoretische Potenziale zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs

4.1 Veränderung des Anteils der verschiedenen Autoklassen an der produzierten Fahrzeugflotte

Im Jahr 2000 machten Kleinwagen einen Anteil von 8,68% an der Gesamtproduktion (exklusive Vans, Utilities und Cabriolets) aus (vgl. auch Abb. 3 und Tab. 8). Im Folgenden soll als theoretischer Maximalwert abgeschätzt werden, was eine 100%ige Verschiebung zu Gunsten von Kleinwagen an Ressourceneinsparung bewirken könnte. Würde man die im Jahr 2000 produzierte Menge von 4,7 Mio. Automobilen (exklusive Vans, Utilities und Cabriolets) beibehalten und nur den Anteil der verschiedenen Autoklassen zu Gunsten von Kleinwagen des Typs Seat Ibiza verschieben, so ergäbe sich maximal eine Einsparung (bei 100% Produktion Kleinwagen) von ca. 29% des TMR verglichen mit dem TMR, der mit der Produktion von Kleinwagen, Mittelklasse- und Oberklassewagen verbunden ist. Diese Ressourceneinsparung lässt sich vor allem durch die Verschiebung von Oberklassewagen zu Kleinwagen erklären, da sich der TMR von Mittelklasse- und Kleinwagen nur geringfügig unterscheidet. Dies verdeutlicht –unabhängig von der nicht gegebenen Funktionsäquivalenz der Fahrzeugklassen und damit einer sehr geringen Realisierungswahrscheinlichkeit–, dass eine solche Strategie zu nicht unerheblichen Ressourceneinsparungen führen könnte.

4.2 Theoretische Potenziale durch Werkstoffsubstitution

In der Automobilbranche und dem sie begleitenden Ingenieurwesen werden unter dem Stichwort „Leichtbaustrategien“ eine Vielzahl von Maßnahmen diskutiert, die eine Reduzierung des Fahrzeuggewichtes bewirken sollen. Geleitet werden diese Diskussionen nicht primär von dem Gedanken umfassend Ressourcen einzusparen, sondern vielmehr durch Gewichtsreduzierung den Treibstoffverbrauch und die damit verbundenen Nutzungskosten und CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase zu senken. Prinzipiell lassen sich nach Jürgens und Meißner (2005) zwei verschiedene Ansätze differenzieren. Der „Multi-Material Ansatz“ zielt darauf ab Gewichtseinsparungen durch eine Kombination von Maßnahmen zu erreichen. Im Gegensatz dazu fokussiert der „Monostrukturelle Ansatz“ auf Gewichtsreduzierung durch den Einsatz bzw. Substitution einzelner Materialien. Als Materialien für den Leichtbau im Automobilbereich kommen unter anderem Magnesium, höherfeste Stähle, Kunststoffe sowie Aluminium in Frage. Im Folgenden wird der Fokus zunächst auf Aluminium sowie Kunststoffe gelegt.

4.2.1 Substitution von Stahl durch Aluminium

Aluminium wird schon heute als Werkstoff im Automobilbereich eingesetzt. Prominente Beispiele sind zum Beispiel die Space frame technology von Audi. Auch für den VW Lupo und die Mercedes S-Klasse wird, wie bereits erwähnt, in stärkerem Umfang Aluminium verwendet. Wie schon oben angedeutet, ist der Einsatz von Primäraluminium aus Ressourcensicht unter Umständen kritisch zu beurteilen, da er einen wesentlich höheren ökologischen Rucksack und damit einen höheren MIPS Koeffizienten hat als zum Beispiel Stahl. Auch unter energetischen Gesichtspunkten ist Primäraluminium in der Herstellungsphase wesentlich intensiver als Primärstahl. Demgegenüber bewirkt die Substitution von Stahl durch Aluminium jedoch eine Reduktion des Fahrzeuggewichtes, was sich wiederum positiv auf den Ressourcenverbrauch auswirken könnte. Um diese Aspekte näher zu beleuchten, werden im Folgenden zwei Aluminiumbauweisen mit einer konventionellen (Stahl)-Bauweise verglichen. Als Beispiel für eine konventionelle Bauweise wurde der VW Golf A4 als repräsentativer Mittelklassewagen ausgewählt.

Um die Gewichtseinsparung von Stahl durch Aluminium zu berechnen, wurde nach Ashby (1999) vorgegangen. Nach Ashby (1999) ist die Wahl eines bestimmten Materials an Kriterien wie Funktion (*function*), Zweck (*objective*) und Beschränkung (*constraint*) geknüpft. Für eine Reihe dieser Kriterien hat Ashby Material Indices definiert. Für eine Autotür (Funktion) wird zum Beispiel ein Material Index für Gewichtsoptimierung (Zweck) unter Berücksichtigung der Festigkeit (Beschränkung) gegeben. Mit Hilfe von diesem Index lassen sich verschiedene Materialien vergleichen und potenzielle Gewichtseinsparungen berechnen. Dabei wird die Gewichtseinsparung wie folgt berechnet:

$$\text{Gewichtseinsparung (\%)} = \left(\frac{E^{1/3} / \rho_{\text{Stahl}}}{E^{1/3} / \rho_{\text{Al}}} - 1 \right) \times 100$$

mit E = Elastizitätsmodul

ρ = Dichte

Tab. 9 zeigt, dass eine maximale Gewichtseinsparung von 52% durch Substitution von Stahl durch Aluminium möglich ist. Dabei wurde vereinfacht davon ausgegangen, dass es sich bei den Materialien um Bleche (panel) handelt, was sicherlich für einen Teil der Stahl/Aluminium Komponenten im Automobil (zum Beispiel Motorhaube, Türen etc.), nicht jedoch für alle Komponenten zutrifft. Ein Vergleich mit anderen Angaben zur Substitution von Stahl durch Aluminium zeigt jedoch, dass der ermittelte Wert durchaus als realistisch zu bewerten ist. Die Aluminium Association (1998) gibt zum Beispiel an, dass 1 kg Aluminium 2 kg Eisenmetalle ersetzt. Ähnliche Angaben werden auch vom

International Aluminium Institute gemacht (IAI, 2000). Jochem et al. (2004) gehen davon aus, dass 1 kg Stahl durch 0,6 kg Aluminium ersetzt werden kann.

Tab. 9: Materialeigenschaften und Gewichtseinsparung durch Aluminium

Material	Dichte (10^3 kg/m^3) ρ	Elastizitätsmodul (GPa) E	Material Index $E^{1/3}/\rho$	Gewichtseinsparung (%)
Low carbon steel¹	7,85	207,5	0,7541	-
Al alloys²				
2008 T4	2,72	70	1,5152	-50,23
2008 T62	2,72	70	1,5152	-50,23
2010 T4	2,72	70	1,5152	-50,23
2010 T41	2,72	70	1,5152	-50,23
2010 T62	2,72	70	1,5152	-50,23
2036	2,75	71	1,5058	-49,91
5182	2,65	71	1,5626	-51,74
5454	2,69	70	1,5321	-50,77
5754	2,67	71	1,5509	-51,37
6009 T4	2,71	69	1,5135	-50,17
6009 T62	2,71	69	1,5135	-50,17
6022 T4	2,69	69	1,5248	-50,54
6022 T62	2,69	69	1,5248	-50,54
6111 T4	2,71	69	1,5135	-50,17
6111 T41	2,71	69	1,5135	-50,17
6111 T62	2,71	69	1,5135	-50,17

¹ Quelle: Ashby (1999).

² Quelle: The Aluminium Association 1998 Aluminium for Automotive Body Sheet Panels, December 1998.

Für den Vergleich der Stahl und Aluminiumbauweise wurden zwei verschiedene Typen von Aluminiumfahrzeugen gewählt. Die Aluminiumbauweise 1 basiert auf einer Studie der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, die die Substitution von Stahl durch Aluminium auf Basis von schon heute konstruierten Aluminiumfahrzeugen für einen Mittelklasse-Pkw ermittelt hat. Danach ergibt sich eine Gewichtseinsparung von ca. 24%. Dies wurde analog auf den VW Golf A4 übertragen und die Menge des eingesetzten Aluminiums bzw. substituierten Stahls nach Ashby berechnet. Die Aluminiumbauweise 1 repräsentiert somit den Stand der Technik.

Die Aluminiumbauweise 2 dagegen geht davon aus, dass die gesamte Stahlmenge durch Aluminium substituiert werden kann, auch wenn dies zum gegenwärtigen Zeitpunkt technisch nicht möglich zu sein scheint. Somit wird eine Gewichtsreduzierung von 328 kg erzielt. Tab. 10 zeigt die Materialkomposition und Gewichte der verschiedenen Bauweisen.

Tab. 10: Materialkomposition und Fahrzeuggewichte von Stahl und Aluminiumbauweisen

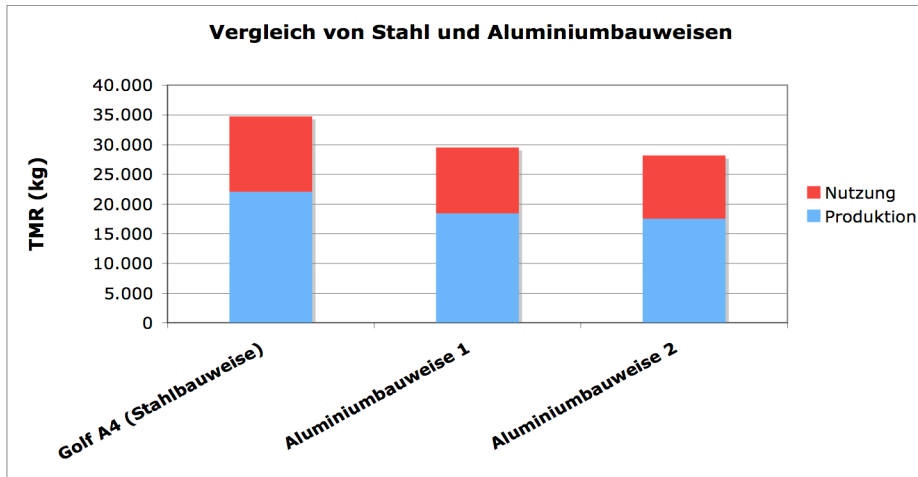
	VW Golf A4, 1.4L Otto		Aluminiumbauweise 1		Aluminiumbauweise 2	
Verbrauch (l/100km)	6,50		5,44		5,15	
Material	Prozent (%)	Gewicht (kg)	Prozent (%)	Gewicht (kg)	Prozent (%)	Gewicht (kg)
<i>Stahl und Eisenwerkstoffe</i>	59,9	634,39	16,6	133,06	0,0	0,00
<i>Leichtmetalle Guß und Knetlegier</i>	4,9	51,83	36,8	293,80	49,0	357,99
<i>Buntmetalle , Guß und Knetlegier</i>	1,8	19,43	2,4	19,43	2,7	19,43
<i>Sondermetalle</i>	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
<i>Polymerwerkstoffe</i>	21,5	227,85	28,5	227,85	31,2	227,85
<i>Prozeßpolymere</i>	0,4	4,16	0,5	4,16	0,6	4,16
<i>Sonstige Werkstoffe</i>	3,0	32,21	4,0	32,21	4,4	32,21
<i>Elektronik/Elektrik</i>	2,4	24,94	3,1	24,94	3,4	24,94
<i>Betriebsstoffe</i>	6,0	63,99	8,0	63,99	8,8	63,99
Gesamt	100,0	1059	100,0	799	100,0	731

Bedingt durch die Gewichtsreduzierung, wird eine Verringerung des Kraftstoffverbrauches in der Nutzungsphase erreicht. Eberle und Franze (1998) geben an, dass Einsparungen zwischen 0,34 l und 0,48 l pro 100 km und 100 kg Gewichtseinsparung erreicht werden können. Diese Bandbreite wurde zu Grunde gelegt, um den Benzinverbrauch der Aluminiumbauweisen in der Nutzungsphase zu berechnen. Als Ausgangspunkt wurde der Mittelwert von 0,41 l pro 100 kg gewählt.

Um den Einfluss von Primär- und Sekundäraluminium auf den Ressourcenverbrauch abzuschätzen, wurden die Verhältnisse zwischen Primär- und Sekundäraluminium zwischen 1:9, 1:1 und 9:1 variiert. Als Ausgangspunkt wurde das Verhältnis Primär- zu Sekundäraluminium von 1:9 angenommen, wie es in der Sachbilanz von VW Golf A4 spezifiziert ist.

Abb. 15 vergleicht den Ressourcenverbrauch der verschiedenen Bauweisen über den Lebenszyklus der Fahrzeuge. Für die beiden Aluminiumbauweisen sind hier die Ausgangslagen (0,41 l pro 100 kg Gewichtseinsparung und Primär- zu Sekundäraluminium 1:9) dargestellt. Wie sich zeigt, haben beide Aluminiumbauweisen, unter den getroffenen Annahmen, sowohl in der Produktions- als auch in der Nutzungsphase einen niedrigeren TMR als die konventionelle Stahlbauweise.

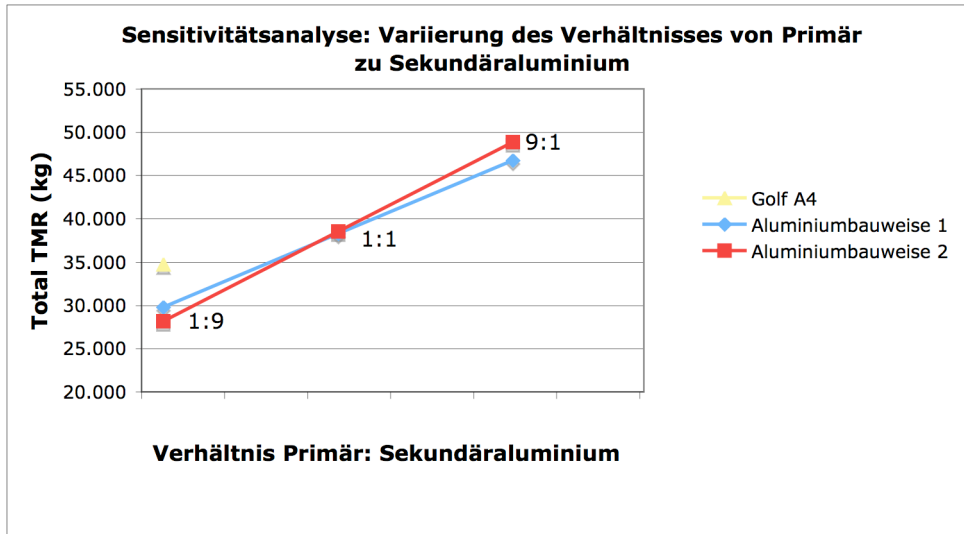
Abb. 15: Vergleich von konventioneller Stahlbauweise und Aluminiumbauweisen auf Basis des TMR pro Fahrzeug



Quelle: Saygin (in Vorbereitung), vorläufige Ergebnisse

Abb. 16 und Abb. 17 zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen, in denen sowohl die Annahmen zu dem Einsatz von Primär- und Sekundäraluminium als auch die Annahmen der Reduzierung des Benzinverbrauchs durch Gewichtseinsparung geändert wurden. Wie Abb. 16 verdeutlicht, hängt der Vorteil der Aluminiumbauweise gegenüber der Stahlbauweise sehr stark von dem Verhältnis von Primär- und Sekundäraluminium ab. Bereits bei einem gleichen Anteil von Primär- und Sekundäraluminium ist der TMR der Aluminiumbauweisen höher als der der Stahlbauweise. Erhöht man den Anteil von Primärmaterial weiter, schneidet die Aluminiumbauweise im Vergleich zur Stahlbauweise wesentlich schlechter ab. Auch im Vergleich der Aluminiumbauweisen untereinander ergeben sich Unterschiede aufgrund der Variation des Primär- und Sekundäranteils. Bei einem Verhältnis von 1:9 schneidet Aluminiumbauweise 2 besser ab, bei 1:1 unterscheiden sich die beiden nur geringfügig, während bei einem Verhältnis von 9:1 die Aluminiumbauweise 1 den kleineren TMR aufweist.

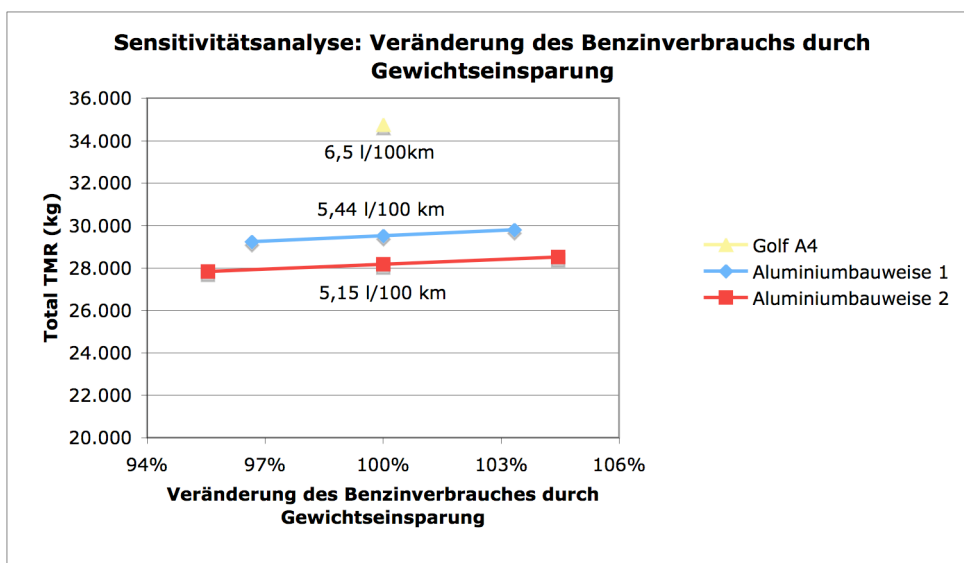
Abb. 16: Sensitivitätsanalyse: Variierung des Verhältnisses von Primär- und Sekundäraluminium



Quelle: Saygin (in Vorbereitung), vorläufige Ergebnisse

In Abb. 17 werden die Spannbreiten der durch Gewichtseinsparung zu erwartenden Benzinverbrauchsverminderung von 0,41 l/100 km (100%) pro 100 kg auf 0,34 l bzw. 0,48 l /100 km pro 100 kg variiert. Wie die Abbildung zeigt, wirkt sich diese Variation nur geringfügig auf den Gesamt-TMR aus. Allerdings haben die Aluminiumbauweisen im Bezug auf den Benzinverbrauch, und damit auch auf den CO₂-Ausstoß pro km, in der Nutzungsphase gegenüber der Stahlbauweise einen klaren Vorteil, wie Tab. 11 zeigt.

Abb. 17: Sensitivitätsanalyse: Veränderung des durch Gewichtseinsparung reduzierten Benzinverbrauchs



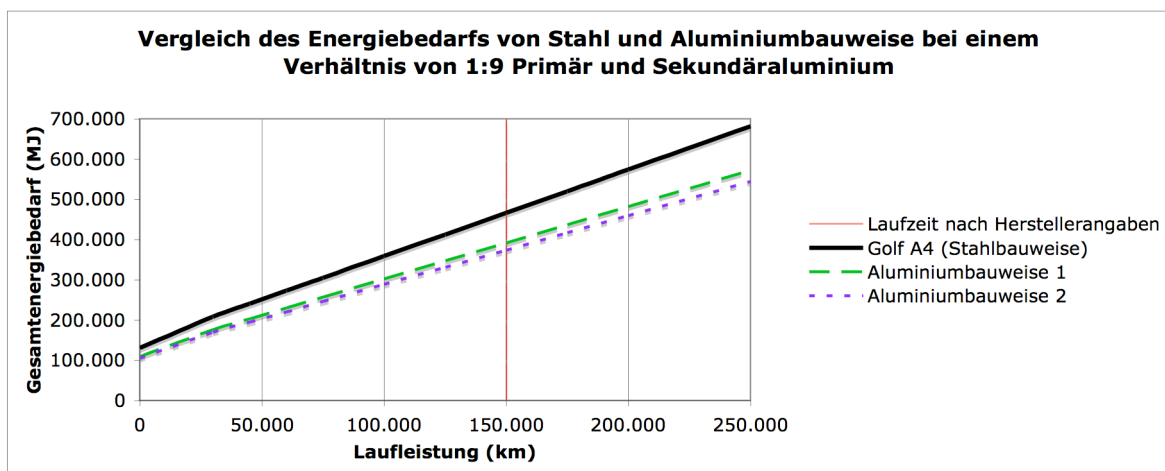
Quelle: Saygin (in Vorbereitung), vorläufige Ergebnisse

Tab. 11: Vergleich der CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase für Aluminium und Stahlbauweisen

CO ₂ -Emissionen (g/km)	VW Golf A4 (Stahlbauweise)	Aluminiumbauweise 1	Aluminiumbauweise 2
Min		124,50	116,70
Mittelwert	154,00	128,80	122,10
Max		133,10	127,60

Ein weiterer grundlegender Parameter ist die Laufleistung der Fahrzeuge. Abb. 18 bis Abb. 19 zeigen die Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den Gesamtenergiebedarf der verschiedenen Bauweisen. Wie die Abbildungen zeigen, hat die Variierung des Anteils von Primär- und Sekundäraluminium auch hier einen erheblichen Einfluss auf den energetischen Vorteil der jeweiligen Bauweisen⁷. Bei einem Verhältnis von 1:9 Primär- zu Sekundäraluminium sind die Aluminiumbauweisen gegenüber der Stahlbauweise klar im Vorteil. Bei einem Verhältnis von 1:1 dagegen, sind die Aluminiumbauweisen zunächst energieintensiver; ab einer Laufzeit von ca. 75.000 km wird der energetische Mehraufwand der Herstellung von Aluminium durch Gewichtseinsparungen und dadurch verbundenen verringerten Benzinverbrauch kompensiert. Danach schneiden die Aluminiumbauweisen energetisch besser ab als die Stahlbauweise. Bei einem Verhältnis von 9:1 tritt dies erst ab einer Laufleistung von ca. 180.000 km ein, einer Laufzeit also, die deutlich über der in der Sachbilanz des Golf A4's angenommenen Laufzeit von 150.000 km liegt.

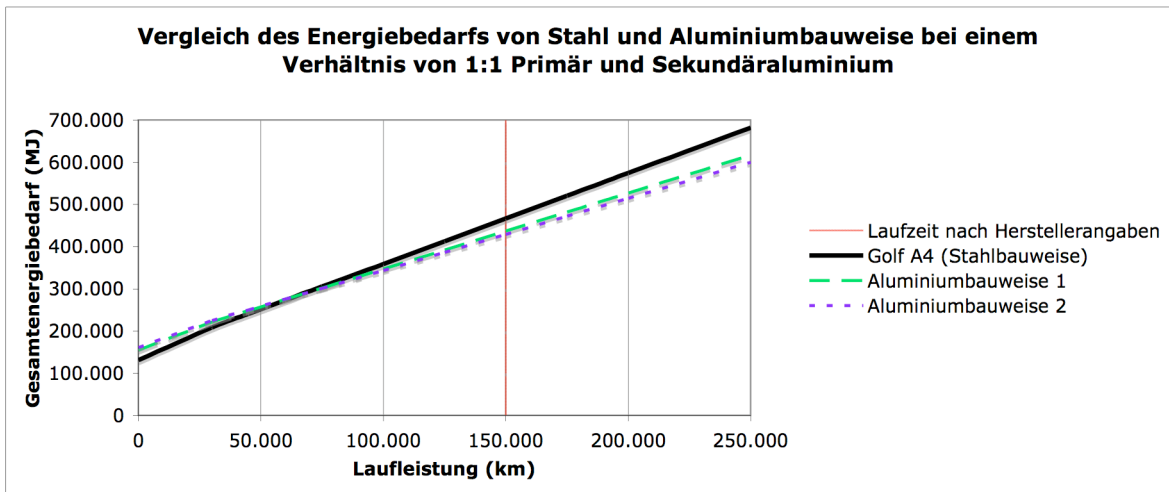
Abb. 18: Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den Energiebedarf von Stahl und Aluminiumbauweisen (Primär: Sekundäraluminium 1:9)



Quelle: Saygin (in Vorbereitung), vorläufige Ergebnisse

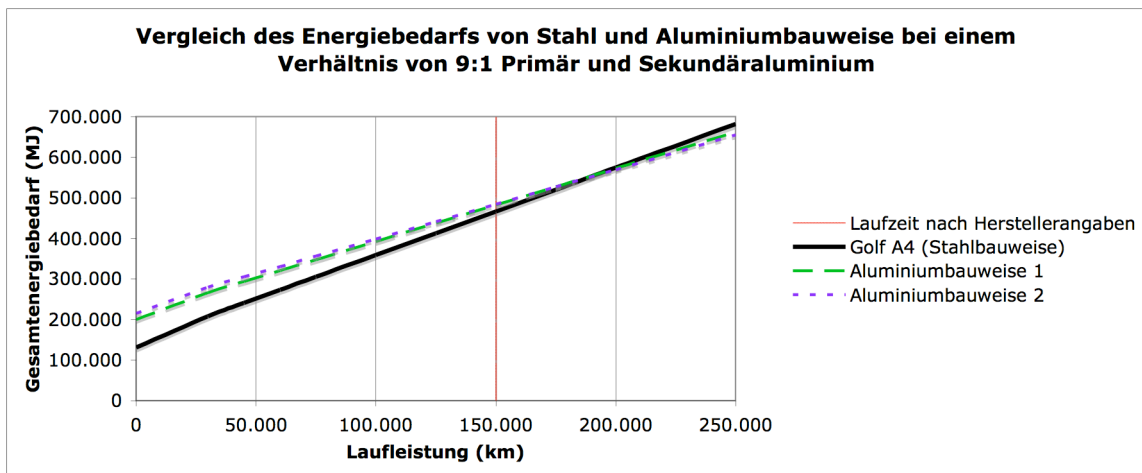
⁷ Das Verhältnis von Primär- und Sekundäraluminium wurde hier nur für die Aluminiumbauweisen variiert, nicht jedoch für den Aluminiumanteil in der konventionellen Stahlbauweise.

Abb. 19: Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den Energiebedarf von Stahl und Aluminiumbauweisen (Primär: Sekundäraluminium 1:1)



Quelle: Saygin (in Vorbereitung), vorläufige Ergebnisse

Abb. 20: Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den Energiebedarf von Stahl und Aluminiumbauweisen (Primär: Sekundäraluminium 9:1)

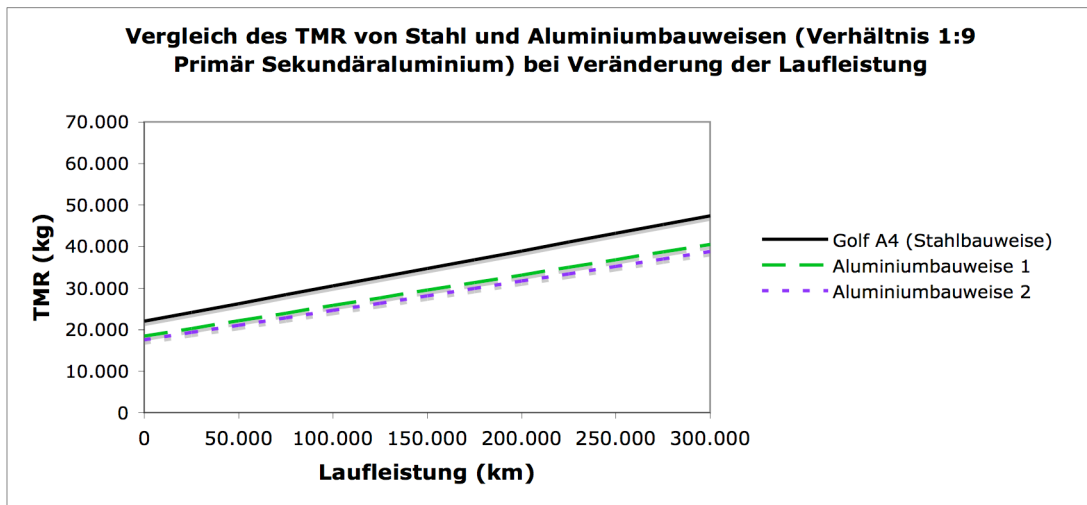


Quelle: Saygin (in Vorbereitung), vorläufige Ergebnisse

Ein etwas anderes Bild ergibt sich, wenn man die Auswirkungen einer Veränderung der Laufzeiten auf den TMR betrachtet, wie Abb. 21 bis Abb. 23 verdeutlichen.

Auch hier haben die Aluminiumbauweisen bei einem Verhältnis von 1:9 einen niedrigeren TMR als die Stahlbauweise. Bei einem Verhältnis von 1:1 jedoch liegt der Punkt, an dem die Aluminiumbauweisen beginnen vorteilhafter zu werden, erst bei einer Laufleistung von über 300.000 km. Bei einem Verhältnis von 9:1 ist der TMR der Aluminiumbauweisen durchweg höher; der Mehrverbrauch an Ressourcen wird hier nicht innerhalb der Lebenszeit der Fahrzeuge kompensiert.

Abb. 21: Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den TMR von Stahl und Aluminiumbauweisen (Primär:Sekundäraluminium 1:9)



Quelle: eigene Berechnungen

Abb. 22: Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den TMR von Stahl und Aluminiumbauweisen (Primär:Sekundäraluminium 1:1)

Quelle: eigene Berechnungen

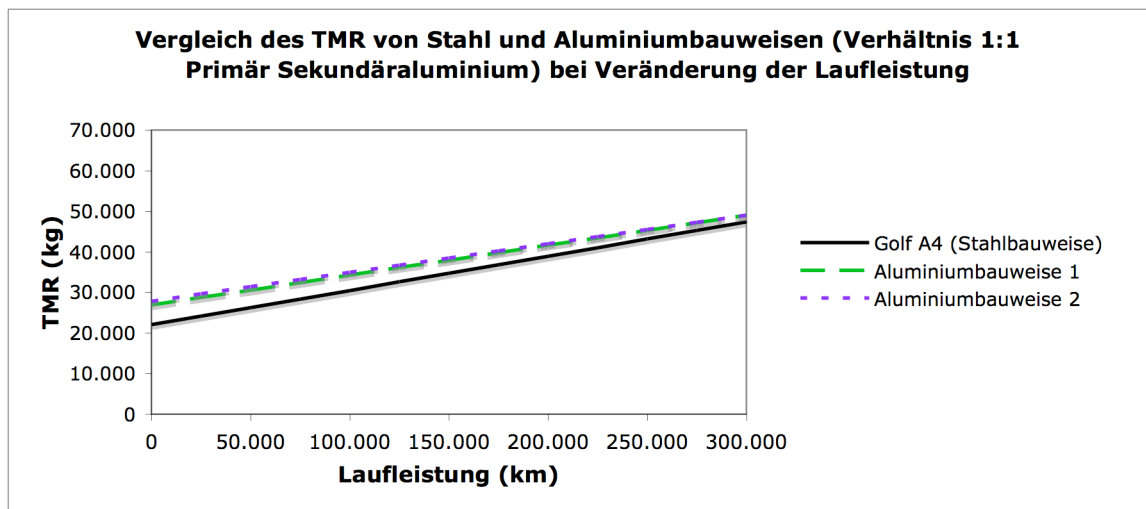
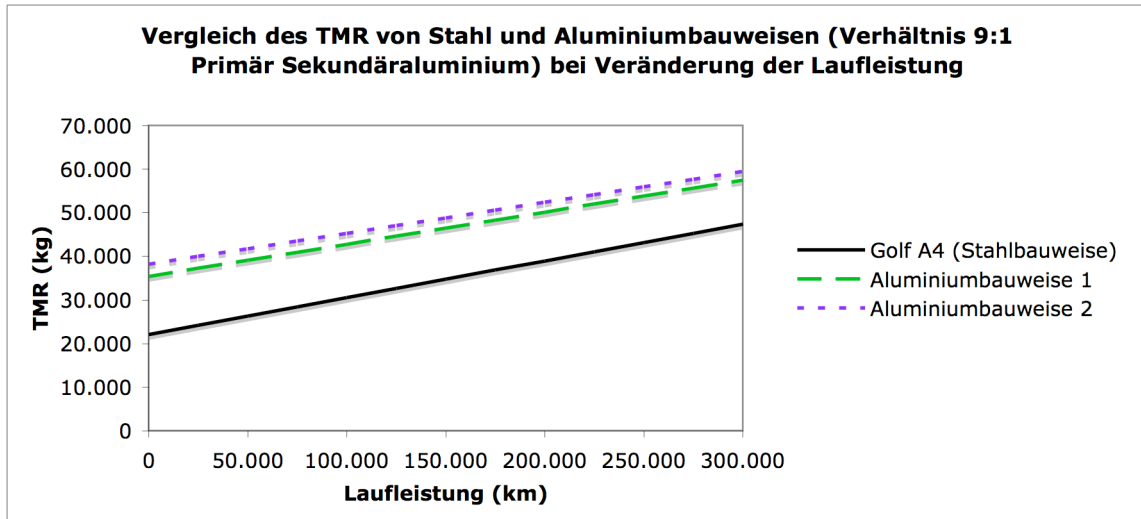


Abb. 23: Auswirkungen einer Veränderung der Laufleistung auf den Energiebedarf von Stahl und Aluminiumbauweisen (Primär:Sekundäraluminium 9:1)



Quelle: eigene Berechnungen

In Deutschland lag der Anteil von Sekundäraluminium am direktem Verbrauch⁸ im Jahr 2005 bei ca. 36% (Metallstatistik, 2005). Dies bedeutet, dass nur bei gezielten Anstrengungen der Automobilhersteller einen entsprechend hohen Input an Sekundärrohstoffen sicherzustellen, das Ergebnis ökologisch sinnvoll ist. Allerdings ist zu bedenken, dass, solange die Technosphäre physisch wächst, der Einsatz von Sekundärrohstoffen insgesamt nur einen Bruchteil der Nachfrage decken kann. Auch führt eine verstärkte Nachfrage von Sekundäraluminium in der Automobilbranche eventuell zu einer Verschiebung des Anteils von Primär- und Sekundäraluminium in anderen Branchen, so dass die Auswirkungen auf die gesamte Wirtschaft nicht unbedingt positiv sind.

4.2.2 Substitution von Stahl durch Kunststoff

Auch Kunststoffe gelten als viel versprechende Leichtbauwerkstoffe, um Stahl in Pkw zu ersetzen. Besonders Faserverbundwerkstoffe, wie glasfaserverstärkter Kunststoff und kohlefaserverstärkter Kunststoff, können im Vergleich zu Aluminium noch weitreichendere Gewichtsreduktionen erzielen. Sie zeichnen sich gegenüber Aluminium durch geringere Dichte und höhere Festigkeit aus. Auch sind die in der Produktion anfallenden Abfälle niedriger als bei Aluminium und Stahl (Altmann et al., 2002). Allerdings ist der Einsatz von diesen Faserverbundwerkstoffen wegen hoher Kosten in der heutigen Automobilproduktion limitiert und weitestgehend auf die Formel-1 sowie die Luft- und Raumfahrt beschränkt (Jürgens und Meißner, 2005; Niesing, 2006). Problematisch ist auch – besonders im Hinblick auf die Altkraft Verordnung – das Recycling

⁸ Aufgrund fehlender Daten zu dem Anteil von Primär- und Sekundäraluminium in Halbzeug spiegeln diese Daten nur den direkten Verbrauch von Sekundäraluminium wider.

von Faserverbundstoffen, da es hierfür derweil keine ausgereiften Prozesse gibt (Altmann et al., 2002).

Nichtsdestotrotz soll hier exemplarisch berechnet werden, ob und in welcher Weise sich eine Substitution von Stahl durch Faserverbundwerkstoffe auf den TMR auswirkt.

Als Beispiel für eine konventionelle Stahlbauweise wurde hier wieder auf den VW Golf A4 zurückgegriffen. Für die Kunststoffbauweise wurde ein kohlefaserverstärkter Kunststoff zu Grunde gelegt, dessen Zusammensetzung, wie weiter unten dargestellt, variiert wurde.

Kohlefaserverstärkte Kunststoffe bestehen hauptsächlich aus einer Kombination von Faserwerkstoffen und Matrixwerkstoffen. Für den Faserwerkstoff wurden hier insgesamt 9 verschiedene Kohlefasern auf Basis von Polyacrylnitril (PAN) zu Grunde gelegt. Für die Matrixwerkstoffe wurden zwei verschiedene Werkstoffe betrachtet: Epoxidharz und Polypropylen (PP). Kohlefasern und Matrixwerkstoffe werden durch „moulding“ miteinander vereint. Für die Berechnung des TMR lagen nur MIPS-Koeffizienten für die einzelnen Werkstoffe (PAN, Epoxidharz und PP) vor. Allerdings sind in Suzuki und Takahashi (2005) Angaben zur Energieintensität von verschiedenen „Moulding“-Verfahren gegeben, so dass diese in der Berechnung des TMR berücksichtigt werden konnten.

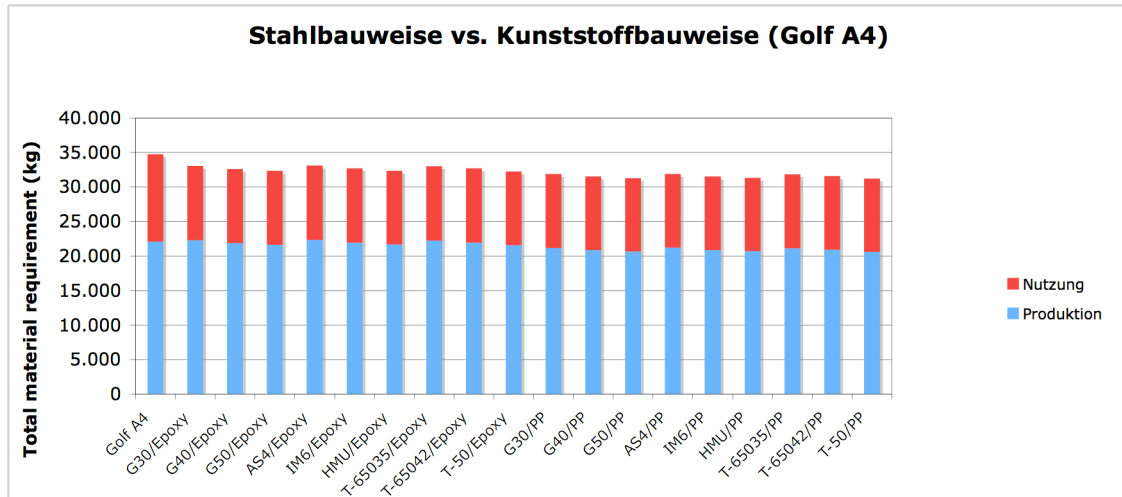
Kunststoffe können Stahl nur zu einem bestimmten Teil ersetzen, da bestimmte Teile des Autos nicht aus Kunststoffen gefertigt werden können. Suzuki et al. (2005) geben Gewichtseinsparungspotenziale von 70% für die Karosserie, Ausstattung sowie für das Fahrwerk durch die Substitution von Stahl durch kohlefaserverstärkte Kunststoffe an. Außerdem werden dort Angaben gemacht, wie viel Stahl in den einzelnen Kategorien (Karosserie, Fahrwerk, Ausstattung, Elektrik, Motor und andere) für eine konventionelle Stahlbauweise enthalten ist. Diese Angaben wurden analog auf den VW Golf A4 übertragen, um so die Menge Stahl, die theoretisch ersetzt werden kann, zu berechnen. Insgesamt wurden so 37% des Stahls durch kohlefaserverstärkte Kunststoffe ersetzt.

Die Menge der eingesetzten kohlefaserverstärkten Kunststoffe wurde wieder mit Hilfe der Ashby Methode berechnet (siehe auch Annex).

Abb. 24 zeigt den TMR für den VW Golf A4 als konventionelle Stahlbauweise sowie eine Reihe von verschiedenen kohleverstärkten Kunststoffbauweisen. Die Kombinationen sind durch die Kohlefasern und den jeweiligen Matrixwerkstoff (E für Epoxidharz und PP für Polypropylen) gekennzeichnet. Angenommen wurden hier ein Volumenanteil der Kohlefaser von 0,4 sowie eine Reduzierung des Benzinverbrauchs von 0,4 l/100 km pro 100 kg Gewichtseinsparung. Die Abbildung zeigt, dass sich durch Substitution von Stahl durch Kohlefaserstoffe nur geringfügige Einsparungen im Ressourcenverbrauch ergeben. Diese liegen im Bereich von 5% bis 10% und ergeben sich hauptsächlich durch Einsparungen in der Nutzungsphase aufgrund von Gewichtsreduktion. Zu beachten ist, dass aufgrund von mangelnden Daten in dieser Analyse kein Verschnitt für die kohlefaserverstärkten Kunststoffe berücksichtigt wurde, so dass sich die Ressourceneinsparung in der Praxis sogar noch etwas verkleinern dürfte. Auch wurde

der Produktionsphase für die Kunststoffbauweisen der gleiche Energieaufwand unterstellt wie bei der Stahlbauweise (d.h. es wurde vereinfacht davon ausgegangen, dass der Zusammenbau des Kunststoffautos nicht energieintensiver ist als der des VW Golf A4's mit konventioneller Stahlbauweise).

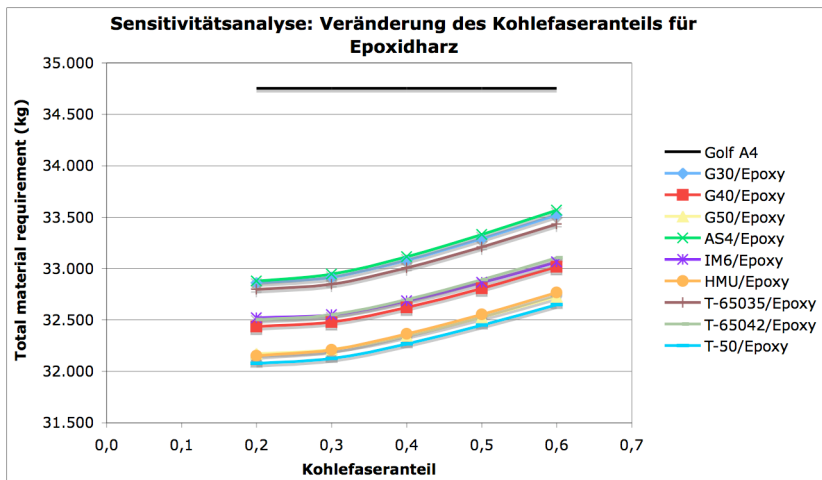
Abb. 24: TMR Stahl vs. Kunststoffbauweise



Quelle: Saygin (in Vorbereitung), vorläufige Ergebnisse

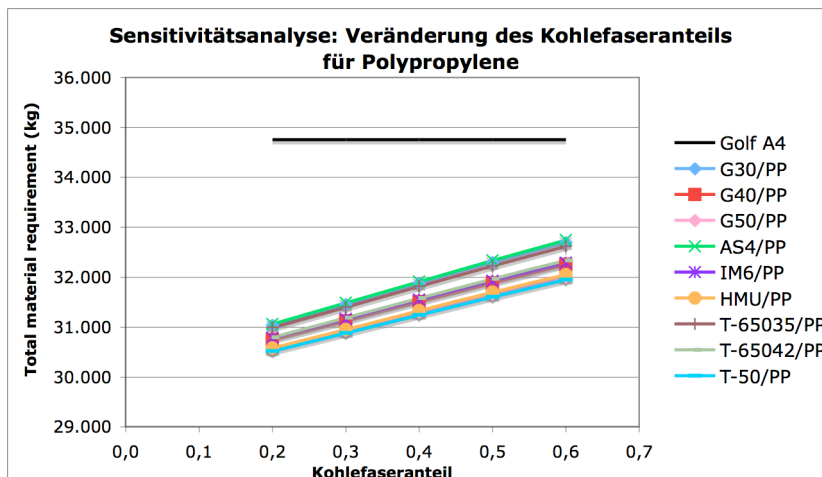
Der unterstellte Anteil des Volumens der Kohlefaser hat einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse: Einerseits bewirkt eine Erhöhung des Volumenanteils eine Erhöhung des Materialindex und somit eine Reduzierung des Fahrzeuggewichtes, andererseits ist Kohlefaser sehr ressourcenintensiv. Eine Erhöhung des Volumenanteils könnte sich somit negativ auf den TMR auswirken. Um diese Aspekte näher zu beleuchten wurde wiederum eine Sensitivitätsanalyse ausgeführt. Abb. 25 und Abb. 26 zeigen die Ergebnisse. Sowohl für PP als auch für Epoxidharz führt eine Erhöhung des Volumenanteils der Kohlefaser bei einem Ausgangsvolumenanteil von 0,4 zu einer Erhöhung des TMR, eine Verringerung zu einem niedrigerem TMR. Der geringste Ressourcenverbrauch lässt sich mit PP als Matrixwerkstoff und T50 als Kohlefaser sowie einem Volumenanteil der Kohlefaser von 0,2 erzielen. In beiden Abbildungen ist der TMR des VW Golf A4's (Stahlbauweise) als Vergleich dargestellt.

Abb. 25: Sensitivitätsanalyse: Veränderung des Kohlefaseranteils für Epoxidharz



Quelle: Saygin (in Vorbereitung), vorläufige Ergebnisse

Abb. 26: Sensitivitätsanalyse: Veränderung des Kohlefaseranteils für Polypropylen



Quelle: Saygin (in Vorbereitung), vorläufige Ergebnisse

4.2.3 Multimaterialansatz

4.2.3.1 Gegenwärtiges Leichtbaubeispiel: Der Drei-Liter Lupo

Der Drei-Liter Lupo gilt als Paradebeispiel für den Leichtbau auf „Multi-Material Basis“ (Jürgens und Meißner, 2005). Im Gegensatz zu monostrukturellen Ansätzen (z.B. Aluminiumfahrzeuge, siehe auch Abschnitt 4.2.1) zeichnet sich der Multi-Material Ansatz dadurch aus, dass Gewichtseinsparungen durch eine Kombination verschiedener Materialien unter Berücksichtigung von Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften erzielt werden. Im VW Lupo wurde eine Gewichtsreduktion von 180 kg erreicht, indem die Stahlkarosserie mit verschiedenen Komponenten aus Aluminium und Magnesium (z.B.

Türen und Sitzlehnenrahmen aus Aluminium und Heck-Klappe aus Aluminium und Magnesium) kombiniert wurde (Jürgens und Meißner, 2005).

Die Vielfalt der eingesetzten Materialien verhindert aber die größere Umsetzung in eine Serienproduktion, da Automatisierungs- und Rationalisierungsmöglichkeiten beschränkt werden. So wird der Multi-Material-Ansatz gegenwärtig eher bei Nischenprodukten zu finden sein (Jürgens und Meißner, 2005).

Im Folgenden wird untersucht welche theoretischen Einsparungen sich ergeben würden, wenn man die gesamte Automobilproduktion auf VW Lupo umstellen würde.

Eine Verschiebung der produzierten Menge zu Leichtbaufahrzeugen des Typen VW Lupo (100% Produktion VW Lupo) würde lediglich eine Ressourceneinsparung von ca. 23% gegenüber der gegenwärtigen Produktionsstruktur bewirken und fällt somit etwas geringer aus als eine 100%ige Produktion von Kleinwagen des Typs Seat Ibiza. Dies scheint zunächst erstaunlich, da das Fahrzeuggewicht des VW Lupo deutlich geringer ist als das des Seat Ibiza (800 kg gegenüber 962 kg (Seat Ibiza) bzw. 1.059 kg (VW Golf A4)). Wie schon in Tab. 4 gezeigt, ist der mit der Produktion verbundene TMR beim VW Lupo deutlich höher als der vom Seat Ibiza, was besonders auf den höheren Einsatz von Leichtmetallen und Sondermetallen beim VW Lupo zurückzuführen ist. Die Kategorie Leichtmetalle ist ca. doppelt bzw. 10-mal so ressourcenintensiv wie die vom Seat Ibiza bzw. dem VW Golf A4. Dies hängt zum einen mit der höheren Menge an Aluminium zusammen, zum anderen mit dem Verhältnis von Primär- und Sekundär-aluminium, die bei Seat Ibiza und VW Lupo mit 1:1, beim VW Golf A4 jedoch mit 1:9 angegeben ist.

Auch ist die Menge von Titan, die beim VW Lupo eingesetzt wird, im Gegensatz zu Seat Ibiza und VW Golf A4 relativ hoch. Der Werkstoff zeichnet sich durch hohe Festigkeit aus, ist leichter als Stahl und hitzebeständiger als Aluminium und zählt daher zu den Leichtbauwerkstoffen. Allerdings ist er sehr viel schwerer zu bearbeiten und deutlich teurer als Stahl oder Aluminium. Auch ist Titan mit einem relativ hohen ökologischen Rucksack verbunden, von daher machen sich selbst geringe Unterschiede in der Menge des eingesetzten Titans beim Ressourcenverbrauch bemerkbar.

Bei den Sondermetallen macht sich der Dieselskatalysator des VW Lupo bemerkbar, der tendenziell einen größeren Platingehalt hat als Otto-Katalysatoren. Zu beachten ist allerdings, dass sich die PGM-Werte auf unterschiedliche Quellen beziehen. Wie bereits erwähnt, lagen für den VW Golf A4 präzise Angaben aus der Ecoinvent Database vor (die ebenfalls für den Ibiza angenommen wurden), während sich die Werte für den VW Lupo nach Hagelüken (2005) auf einen Durchschnittsdieselskatalysator mit einem Hubraum kleiner als 2 l beziehen.

Tab. 12 verdeutlicht die Unterschiede im Einsatz von spezifischen Leichtmetallen und Sondermetallen im VW Lupo gegenüber VW Golf A4 und Seat Ibiza und deren Auswirkungen auf den TMR.

Tab. 12: Vergleich von TMR für spezifische Metalle

	Anteile am Fahrzeuggewicht in kg			TMR (kg)		
	Seat Ibiza	VW Lupo	VW Golf A4	Seat Ibiza	VW Lupo	VW Golf A4
Leichtmetalle						
Aluminium	86,00	137,00	64,00			
<i>Primär</i>	43,00	68,50	6,40	1.591,00	2.534,00	236,80
<i>Sekundär</i>	43,00	68,50	57,60	36,55	58,23	48,96
Titan	0,29	3,60	0,31	68,90	855,36	73,66
Sondermetalle						
Platin	0,0016	0,0048	0,0016	1.093,70	3.246,93	1.093,70
Rhodium	0,0003		0,0003	29,97		29,97

Schweimer (1998) variiert in seiner Sachbilanz des Drei-Liter Lupo den Anteil von Primär- und Sekundäraluminium und untersucht den Einfluss auf Primärenergieverbrauch und Emissionen bei der Herstellung des VW Lupo. Dabei wird der Anteil von Sekundäraluminium auf 80% hoch gesetzt. Analog dazu wurde der Anteil von Sekundäraluminium in dem vorliegenden Paper ebenso verändert, um so die Auswirkung einer solchen Veränderung auf den TMR abzuschätzen. Allein auf den VW Lupo bezogen würde eine Erhöhung des Sekundäraluminiums auf 80% eine Reduzierung des TMR von ca. 1.486 kg bewirken. Bezogen auf die Gesamtproduktion (100% VW Lupo) vergrößert sich die Einsparung um 5,75% auf 28,8%.

Bedingt durch den geringeren Kraftstoffverbrauch ist der TMR des VW Lupo in der Nutzungsphase im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen deutlich geringer und kompensiert damit teilweise den höheren TMR in der Produktionsphase.

4.2.3.2 Variation von VW Golf A4 und VW Lupo: Substitution von Stahl durch Kombination von Magnesium, Aluminium und Kohlefaser

Altmann et al. (2002) untersuchen den Einfluss von Leichtbauoptionen durch Veränderungen des Materialmixes auf den kumulierten Energieeinsatz sowie auf die CO₂-Emissionen verschiedener Autotypen. Dabei gehen sie davon aus, dass Stahl durch 15% Magnesium, 20% Faserverbund und 65% Aluminium ersetzt werden kann. Da Altmann et al. (2002) sowohl den VW Golf A4 sowie den VW Lupo betrachten, können ihre Angaben direkt übernommen werden, um die Auswirkungen, die solch eine Veränderung im Materialmix auf den TMR von VW Golf A4 und VW Lupo hätten zu berechnen. Tab. 13 fasst die Annahmen von Altmann et al. (2002) zusammen. Das Reduktionspotenzial ist laut Altmann et al. (2002) für den VW Golf A4 größer als für den VW Lupo, da der VW Lupo schon größere Aluminiumanteile enthält, während der VW

Golf A4 nach konventioneller Stahlbauweise gebaut ist. Auch substituieren Altmann et al (2002) nicht die gesamte Menge des Stahls, sondern gehen davon aus, dass ein bestimmter Anteil von Stahl im Fahrzeug verbleiben muss. Die Einsparungen durch die Konstruktion⁹ wurden im Folgenden nicht berücksichtigt, da nicht festzustellen ist, welche Materialien davon betroffen sind. Das Fahrzeuggewicht des Leichtbaumix beträgt demnach in dieser Studie 610 kg für den VW Lupo und 749 kg für den VW Golf A4.

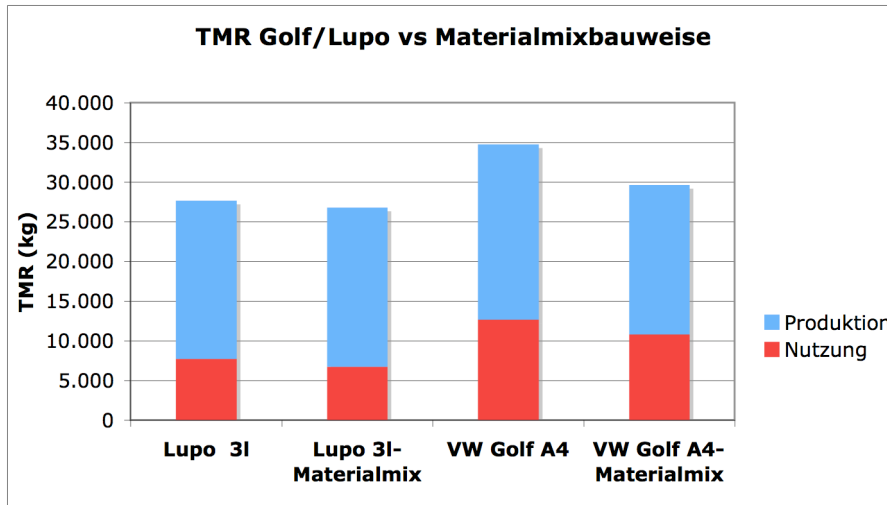
Tab. 13: Substitution von Stahl durch Materialmix nach Altmann et al (2002)

	VW Lupo	VW Golf A 4
Fahrzeuggewicht	800 kg	1.049 kg
Stahlanteil	407 kg	634 kg
Gewichtsreduktion Fahrzeug	30%	35%
Substituierte Stahlmenge	350 kg	550 kg
Einsparungen aus Konstruktion	50 kg	69 kg
Fahrzeuggewicht Leichtbaumix	560 kg	680 kg
Fahrzeuggewicht Leichtbaumix (exkl. Einsparungen aus Konstruktion)	610 kg	749 kg

Abb. 27 zeigt den TMR für VW Golf A4 und VW Lupo, der sich durch die Veränderung des Materialmixes ergibt und vergleicht ihn mit dem ursprünglichen Werten von VW Golf A4 und VW Lupo. Wie man deutlich sieht, bewirkt eine Veränderung des Materialmixes und eine damit verbundene Gewichtsreduktion für den VW Golf A4 deutliche Einsparungen im TMR. Für den VW Lupo fallen diese Einsparungen etwas geringer aus, was unter anderem damit zusammenhängt, dass die substituierte Stahlmenge geringer ist und der Anteil von Primär- und Sekundäraluminium im VW Lupo mit 50:50 höher ist als der vom VW Golf A4 (10:90). Bei der Berechnung des TMR vom Materialmix wurden die Anteile des Verschnittes nur proportional zu den veränderten Materialmengen geändert, d.h. es wurde nicht davon ausgegangen, dass es durch Veränderungen im Materialmix zu Verschiebungen im Verschnitt kommt. Auch wurden alle anderen Variablen (z.B. Energieaufwand während der Herstellung der Autos) konstant gehalten. Der TMR in der Nutzungsphase ist bei beiden Fahrzeugen niedriger, da sich Einsparungen im Kraftstoffverbrauch durch Gewichtsreduzierungen ergeben. Diese wurden nach Eberle und Franze mit 0,41 kg/100 km pro 100 kg Gewichtseinsparung für Benzin und 0,31 l/100 km pro 100 kg für Dieselfahrzeuge berechnet. Für den VW Lupo als Diesel ergibt sich damit ein geringeres Einsparpotenzial in der Nutzungsphase.

⁹ Eine Reduktion des Fahrzeuggewichtes hat bei vielen Komponenten (Bremsen, Stossdämpfer, Fahrzeugtank) oft auch eine konstruktive Verkleinerung zur Folge (Altmann et al., 2002).

Abb. 27: Vergleich des TMR von VW Lupo und VW Golf A4 bei Veränderung des Materialmixes



Quelle: Saygin (in Vorbereitung), vorläufige Ergebnisse

Würde man die gegenwärtige Produktionsstruktur (2000) beibehalten und den Materialmix der Mittelklassewagen gemäß Altmann et al. (2002) ändern, so ergäbe sich ein theoretisches Einsparpotenzial von 9% des TMR der gesamten produzierten Pkw-Flotte (Produktion und Nutzung). Bei 100%iger Produktion von Mittelklassewagen mit verändertem Materialmix würde dieses Potenzial bei 27% liegen.

Bei einer Änderung des Materialmixes des VW Lupo, würde sich bei 100%iger Umstellung der Produktionsstruktur auf diesen Typ keine größere Ressourceneinsparung als bei dem VW Lupo mit Normalbauweise ergeben. Eine Erhöhung des Anteils von Sekundäraluminium auf 80% bei der Lupomaterialmixbauweise hingegen, führt zu einer etwas größeren Ressourceneinsparung (33%) gegenüber den 29%, die sich durch Erhöhung des Sekundäranteils von Aluminium bei der normalen Bauweise ergeben.

4.3 Veränderung des Produktdesigns

Um die gegenwärtigen Fahrzeuge mit möglichen Alternativen zu vergleichen, wurden beispielhaft zwei Fahrzeugtypen ausgewählt. Der erste Typ kann als mittelfristig realisierbare Option angesehen werden. Der zweite Typ kann als langfristige Zukunftsvision dienen und wird zudem als Extremvariante herangezogen, um die aus jetziger Sicht technisch maximalen Potenziale darzustellen.

4.3.1 Mittelfristige Zukunftsvision: Der Loremo LS als Beispiel

Der von der Loremo AG konzipierte „Loremo LS“ ist ein viersitziges Fahrzeug, das sich vor allen Dingen durch den geringen Treibstoffverbrauch (1,5 l/100 km) und geringes Fahrzeuggewicht auszeichnet. Mit 450 kg ist der Loremo um 350kg leichter als der VW Lupo und weniger als halb so schwer wie der Seat Ibiza oder VW Golf A4. Die „Kon-

zentration auf das Wesentliche“ ist laut Loremo AG u.a. ursächlich für das geringe Fahrzeuggewicht. Dementsprechend ist die Motorleistung mit 20PS auch vergleichsweise gering, allerdings soll der Loremo eine Höchstgeschwindigkeit von bis zu 160 km/h erreichen. Die Veränderung des Produktdesigns spiegelt sich u.a. auch in der Anordnung der Sitze und der Türöffnungen wieder. So sind die beiden hinteren Sitze rückwärtig ausgerichtet, die beiden Vordertüren öffnen sich nach oben. Der Loremo ist gegenwärtig noch ein Prototyp, soll aber laut Loremo AG schon ab 2009 erstmals in Kleinserie produziert werden.

Abb. 28: Loremo



Quelle: Loremo AG (www.loremo.com)

Für den Loremo lagen grobe Schätzwerte zur Materialkomposition vor. Danach unterscheidet sich die prozentuale Verteilung der einzelnen Werkstoffkategorien nicht wesentlich von denen der gegenwärtigen Pkw, der Stahlanteil ist etwas geringer, der Leichtmetallanteil dafür etwas höher als z.B. beim VW Lupo oder bei der S-Klasse. Um grobe Richtwerte für die einzelnen Materialien innerhalb der Werkstoffklassen zu ermitteln, wurden ähnliche Annahmen getroffen, wie für die Mercedes S-Klasse. Dabei wurde wiederum auf die Mittelwerte der anderen Sachbilanzen zurückgegriffen. Der Wert für die in dem Dieselskatalysator enthaltene Menge an Platin wurde ebenso wie für den VW Lupo aus Hagelüken (2005) für die Euro-Abgasnorm IV übernommen. Für die Kategorie Elektronik lagen für den Audi A6 Werkstofffraktionen vor (Seitz, 2006), die analog auf den Loremo übertragen wurden, um diese Kategorie besser abzuschätzen. Dabei wurden die verschiedenen Werkstoffe (z.B. Polymere) den einzelnen Kategorien zugeordnet, nur der Anteil der Leiterplatten wurde – ähnlich wie bei der Mercedes S-Klasse – der Kategorie Elektronik zugeordnet.

Angaben für Produktion, Stromverbrauch und Nutzung fehlen für den Loremo, da dieser noch nicht produziert und erst ab 2009 in Serie gehen soll. Auch hier wurde auf die Mittelwerte der Sachbilanzen von Seat Ibiza, VW Golf A4 und VW Lupo zurückgegriffen. Angaben für den Kraftstoffverbrauch stammen von der Homepage des Loremo. Die Menge an Strom und Gasverbrauch für die Produktion sowie die benötigten Ersatzteile in der Nutzungsphase wurden, wie auch für den Mercedes, berechnet, indem der am Fahrzeuggewicht gewichtete Mittelwert zu Grunde gelegt wurde. Laut Loremo

AG soll der Loremo eine ähnlich hohe Laufleistung erzielen wie gegenwärtige Fahrzeuge, daher wurde die Laufleistung mit 150.000 km festgesetzt. Der Loremo ist ein Dieselfahrzeug. Wie auch beim VW Lupo wurde daher die Menge von Platin für einen Dieselskatalysator für die Euro-Abgasnorm IV nach Hagelüken (2005) übernommen. Wie bereits oben beschrieben ist der so angenommene Platingehalt für die beiden Dieselfahrzeuge (VW Lupo und Loremo) deutlich höher als die spezifischen Angaben für den VW Golf A4, was den – im Bezug auf das Fahrzeuggewicht - relativ hohen Wert von VW Lupo und Loremo in der Produktionsphase erklärt. Bei 20 PS dürfte die benötigte Menge an PGM zudem deutlich unter den Werten liegen, die Hagelüken für einen <2 l Motor angibt. Die hier angenommenen Werte sind daher eher überschätzt. Da die Konstellation des verwendeten Katalysators wesentlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat, sollte dies durch weitergehende Untersuchungen geklärt werden.

Tab. 14 zeigt die Ergebnisse des TMR für den Loremo. Im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen (siehe auch Tab. 4) ist der TMR des Loremo in der Produktions- und insbesondere in der Nutzungsphase deutlich geringer.

Eine Umstellung der gegenwärtigen Produktion zu 100%iger Bauweise nach dem Typ Loremo würde eine theoretische Ressourceneinsparung von ca. 49% gegenüber der gegenwärtigen Produktion einbringen und liegt damit deutlich über den Einsparungen, die mit einer 100%igen Produktion von Kleinwagen des Typs Seat Ibiza verbunden wäre.

Durch den sehr geringen Treibstoffverbrauch von 1,5 l/100 km schneidet der Loremo besonders günstig in der Nutzungsphase ab. Mit einem TMR von nur etwa 5.000 kg ist dieser gegenüber dem Seat Ibiza und dem VW Golf A4 etwa um einen Faktor von 2,5 Ressourcen leichter, gegenüber dem VW Lupo um einen Faktor von 1,5 und gegenüber dem Mercedes sogar um einen Faktor von 3,7 niedriger.¹⁰

Tab. 14: TMR des Loremo

	TMR (kg)
Produktion	13.164
Nutzung	5.083
Gesamt	18.247
TMR/100 km	12,16

¹⁰ Die Nutzungsphase beinhaltet außer dem Öl- und Benzinverbrauch auch noch eine gewisse Menge an Ersatzteilen sowie Energieaufwendungen, die während der Nutzungsphase entstehen. Da für die Menge an Ersatzteilen und Energieaufwendungen ähnliche Annahmen getroffen wurden wie bei den anderen Fahrzeugen, sind die Einsparungen während der Nutzungsphase beim Loremo nicht noch größer.

4.3.2 Langfristige Zukunftsvision: Das PAC-Car II als Beispiel

Als langfristige Zukunftsvision wurde das von der ETH Zürich entwickelte und mehrfach ausgezeichnete PAC-Car II gewählt. Dieses Fahrzeug wurde als Prototyp für „fuel economy races“ entwickelt und unterscheidet sich damit sowohl in Punkto Design und Funktionalität wesentlich von heute konstruierten Fahrzeugen bzw. anderen Prototypen wie dem Loremo. Es soll hier trotzdem als Extrem herangezogen werden, um zu zeigen, was technisch bereits heute möglich ist und in welche Richtung sich ein dematerialisiertes und energieeffizientes Fahrzeug der Zukunft entwickeln könnte.

PAC-Car II ist mit einem Gewicht von ca. 30 kg nochmals um einen Faktor 14 niedriger als das des Loremo. Es bietet Platz für eine Person, die das Fahrzeug im Liegen fährt und mit Hilfe eines Joysticks steuert. Das Chassis besteht überwiegend aus kohlefaserverstärktem Kunststoffen. PAC-Car II wird mit Brennstoffzellen betrieben und hält mit einer umgerechneten Reichweite von 5.385 km pro Liter Benzin den Weltrekord als kraftstoffsparendstes Fahrzeug.

Abb. 29: PAC-Car II



Quelle: ETH Zürich (2006)

Für die Berechnung des TMR lag eine relativ ausführliche Stückliste zu den einzelnen Komponenten des PAC-Car II vor (Kolb, pers. Komm., 2007). Allerdings sind nicht für alle Komponenten spezifische Materialangaben bekannt. Für diese Teile wurde daher nur das Eigengewicht mit einberechnet. Das Chassis des PAC-Car II besteht aus kohlefaserverstärktem Kunststoff mit Epoxidharz. Zur Berechnung des TMRs wurde der Volumenanteil der Kohlefaser zwischen 0,2 und 0,6 variiert. Wegen fehlender Angaben wurde möglicherweise anfallender Verschnitt nicht berücksichtigt.

Tab. 15 zeigt den TMR des PAC-Car II für die Produktion und Nutzung. Der TMR der Werkstoffe wird durch das in der Brennstoffzelle enthaltene Platin dominiert (ca. 70% des TMR). Der Energieaufwand während der Produktion ist nicht bekannt. Ähnlich wie für den Loremo und die Mercedes S-Klasse wurde zur Ermittlung des Energieaufwandes der am Fahrzeuggewicht gemittelte Mittelwert der anderen Sachbilanzen herangezogen. Das Transportvolumen für das PAC-Car II wurde wie auch für die S-Klasse und den Loremo durch den am Fahrzeuggewicht gewichteten Mittelwert berechnet. Die in der Nutzungsphase anfallenden Ersatzteile wurden ebenso ermittelt, auch wenn für

das PAC-Car II wahrscheinlich andere Ersatzteile anfallen als für die übrigen Fahrzeuge. Das PAC-Car II ist Wasserstoff betrieben. Der TMR des Wasserstoffs ist abhängig von den verschiedenen Herstellungsverfahren. Gegenwärtig wird Wasserstoff durch verschiedene Verfahren hergestellt, häufigste Herstellungsart ist das „Cracking“. Die verschiedenen Herstellungsarten des Wasserstoffes wurden für die Berechnungen des TMR berücksichtigt, wie

Tab. 15 zeigt.

Die Laufleistung des PAC-Car II wurde hypothetisch mit 150.000 km angesetzt, um eine Vergleichbarkeit mit den anderen Fahrzeugen zu erzielen.

Der TMR für die Werkstoffe für das PAC-Car II ist trotz des hohen Anteils von Platin im Vergleich zum VW Golf A4 um etwa 73% niedriger, im Vergleich zum Seat Ibiza um etwa 69%. Durch seinen äußerst geringen Treibstoffverbrauch von 4,8 g Wasserstoff pro 100 km (ca. 0,018 l Benzin) ist der TMR der Nutzung (inkl. Ersatzteile) im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen ebenfalls deutlich niedriger. Würde man die im Jahr 2000 produzierte Menge von Fahrzeugen komplett auf Bautypen a la PAC-Car II umstellen, ergäbe sich eine maximale Einsparung im Ressourcenverbrauch von 84%.

Tab. 15: TMR des PAC-Car II

	TMR (kg) bei Kohle- faseranteil von 0,2	TMR (kg) bei Kohle- faseranteil von 0,6	TMR (kg) bei Kohle- faseranteil von 0,2	TMR (kg) bei Kohle- faseranteil von 0,6	TMR (kg) bei Kohle- faseranteil von 0,2	TMR (kg) bei Kohle- faseranteil von 0,6
	Wasserstoff, flüssig, Produktions-Mix, ab Werk		Wasserstoff, Cracker, APME, ab Werk		Wasserstoff, flüssig, Chlorelektrolyse, Produk- tions-Mix, ab Werk	
Produktion	3.925	4.123	3.925	4.123	3.925	4.123
Werkstoffe	2.970	3.169	2.970	3.169	2.970	3.169
Energie	944	944	944	944	944	944
Transport	10	10	10	10	10	10
Nutzung	81	81	80	80	99	99
Fahrbetrieb (inkl. Was- serstoffverbrauch)	48	48	47	47	66	66
Energie	33	33	33	33	33	33
Gesamt	4.006	4.205	4005	4204	4024	4222
TMR/100 km	2,67	2,80	2,67	2,80	2,68	2,81

4.4 Weitere Einflussmöglichkeiten zur Nutzung von Potenzialen

4.4.1 Veränderung der Laufleistung

Theoretisch ergeben sich durch eine Veränderung der Laufleistung Einsparungspotenziale. Wie bereits oben erwähnt, wird die tatsächliche Lebensdauer von Pkw weitaus höher liegen als die in den Sachbilanzen von Volkswagen angegebenen 150.000 km. Offiziellen Statistiken zu Folge betrug das durchschnittliche Fahrzeugalter bei der Löschung im Jahr 2000 11,6 Jahre (BMVBS, 2005). Bei einer durchschnittlichen Fahrleistung von 13.100 km im Jahr 2000 (BMVBS, 2005) ergibt sich eine durchschnittliche Gesamtfahrleistung von ca. 152.000 km, was sich relativ gut mit den Angaben von Volkswagen deckt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die „Löschungen“ neben der Verschrottung und der Stilllegung auch den Export von Gebrauchtfahrzeugen ins Ausland beinhalten. Verlässliche Zahlen zu Umfang oder km-Stand der exportierten bzw. verschrotteten Fahrzeuge existieren nicht. Die offiziellen Statistiken erfassen nicht alle Fahrzeuge, da z.B. private Exporte innerhalb der EU keiner statistischen Meldepflicht, und außerhalb der EU erst ab einem Warenwert von 800 Euro und einem Fahrzeuggewicht über 1.000 kg einer Meldepflicht unterliegen (ARGE, 2001). Es ist jedoch anzunehmen, dass ein Großteil der gebrauchten Fahrzeuge exportiert wird, und so einen Teil seines Lebensabschnitts im Ausland verbringt. Die Arbeitsgemeinschaft Altauto schätzt, dass im Zeitraum von 1997 – 1999 ca. 1,1 bis 1,7 Millionen Pkw pro Jahr verschrottet wurden (ARGE, 2001). Dies entspricht einem Anteil von 31% bis 50% an den Löschungen, so dass ca. 50% bis 70% der gelöschten Fahrzeuge exportiert werden. Ohne gleichzeitige Änderungen im Konsumverhalten der deutschen Autofahrer ist zu erwarten, dass sich eine Änderung der Laufzeiten hauptsächlich im Ausland auswirken würde.

Eine Veränderung der Laufzeiten wirkt sich in zweierlei Hinsicht auf den TMR aus. Einerseits bewirkt eine Erhöhung der Laufzeiten bedingt durch den damit verbundenen höheren Benzin-, Diesel- und Ölverbrauch eine Erhöhung des TMR in der Nutzungsphase. Gleichzeitig verringert sich der Anteil des mit der Produktion verbundenen TMR am Gesamt TMR. Der TMR pro 100 km sinkt also, wie für die verschiedenen Fahrzeugtypen in Tab. 16 veranschaulicht.

Tab. 16: Auswirkung der Veränderung der Laufleistung auf den TMR

	Seat Ibiza	VW Golf A4	Mercedes	VW Lupo	Loremo	PAC-Car II (0,2 Kohle- faseranteil)	PAC-Car II (0,6 Kohle- faseranteil)
Laufleistung laut Hersteller (km)	TMR (kg) pro 100 km						
150.000	20,90	23,17	41,41	18,43	12,16	2,67	2,81
200.000	17,84	19,49	34,22	15,12	9,96	2,02	2,12
250.000	16,01	17,28	29,91	13,13	8,65	1,63	1,71
300.000	14,79	15,81	27,04	11,8	7,77	1,37	1,43

4.4.2 Veränderung des Benzinverbrauches durch eine Obergrenze für CO₂-Emissionen pro 100 km

Die europäische (ACEA) japanische (JAMA) und koreanische (KAMA) Automobilindustrie haben sich 1998 durch eine freiwillige Selbstverpflichtung gegenüber der Europäischen Union verpflichtet, den CO₂-Ausstoß von neuen Personenkraftwagen bis 2008 auf durchschnittlich 140 g/km zu senken. Als Zwischenziel wurde für das Jahr 2003 ein Zielwert von 165-170 g/km genannt. Die Erreichung des 2008er Zieles wird jedoch allgemein als fraglich angesehen. Drei der in diesem Paper untersuchten Fahrzeuge liegen mit 158 g/km (Seat Ibiza), 154 g/km (VW Golf A4) und 224 g/km (Mercedes S-Klasse) über dem Durchschnittszielwert von 140 g/km. Lediglich der VW Lupo liegt mit 81 g/km deutlich unter dem durchschnittlichen Zielwert. Die Europäische Union erwägt nun, die Automobilindustrie gesetzlich zu einer Absenkung auf durchschnittlich 120 g/km¹¹ zu verpflichten.

In dem letzten jährlichem Monitoring-Bericht der Europäischen Kommission zur Selbstverpflichtung der Europäischen Automobilindustrie werden die CO₂-Emissionen für in Deutschland neu zugelassene Fahrzeuge mit 178 g/100 km für Benzin und 168 g/100 km für Dieselfahrzeuge für das Jahr 2004 angegeben (Europäische Kommission, 2006). Dies entspricht einem Benzinverbrauch von 7,5 l/100 km bzw. 6,3 l Diesel pro 100 km. Um den Zielwert von 120 g/km in 2012 zu erreichen, müssten die CO₂-Emissionen für Benzin folglich um 58 g/km (2,44 l Benzin pro 100 km), die für Diesel Pkw um 48 g/km (1,8 l/100 km) gesenkt werden. Eberle und Franze geben für Benzin eine Minderung des Benzinverbrauchs von 0,34 – 0,48 l/100 km bei einer Gewichtsreduzierung von 100 kg an. Für Dieselfahrzeuge ist die Einsparung mit 0,29-0,33 l/100 km pro 100 kg Gewichtsverminderung etwas niedriger. Diese Werte können herangezogen werden, um zu berechnen, um wie viel das Gewicht von Neufahrzeugen reduziert werden müsste, um alleine durch eine Gewichtsreduzierung den von der Eu-

¹¹ Verbesserungen in der Fahrzeugtechnologie sollen dabei die Emissionen auf 130 g/km senken. Die restlichen 10 g/km sollen durch Effizienzverbesserungen bei z.B. Klimaanlage und Reifen, bzw. der Beimischung von Biokraftstoffen kommen (Europäische Kommission, 2007)

ropäischen Kommission vorgeschlagenen Zielwert zu erreichen. Legt man den Mittelwert von 0,41 l/100 km pro 100 kg für Benziner bzw. 0,31 l/100 km pro 100 kg für Dieselfahrzeuge zu Grunde, so müsste das durchschnittliche Fahrzeuggewicht für Benzi-ner um ca. 596 kg, das für Dieselfahrzeuge um ca. 582 kg reduziert werden. Selbst bei einem abgeschwächten Zielwert von 130 kg CO₂/km wäre immerhin noch eine Reduk-tion von 494 kg für Benziner bzw. 461 kg für Dieselfahrzeuge notwendig, um den Zielwert alleine durch Gewichtsreduktion zu erreichen. Laut Europäischer Kommission betrug das durchschnittliche Gewicht 2004 von neu zugelassenen Benzinern in Deutschland 1.293 kg, das von Dieselfahrzeugen 1.563 kg. Übertragen bedeutet dies eine Gewichtsreduktion von 46% des Fahrzeuggewichtes für Benzi-ner bzw. 37% für Dieselfahrzeuge.

Neuere Zahlen zu den CO₂-Emissionen von neu zugelassenen Pkw in Deutschland liegen für das Jahr 2006 vor. Demnach betrugen die durchschnittlichen Emissionen von neu zugelassenen Pkw im Jahr 2006 171,8 g/km für Benzi-ner und 173,4 g/100 km für Dieselfahrzeuge (KBA, 2007). Die CO₂-Emissionen für Benzi-ner sind in den letzten 2 Jahren also leicht gesunken, die für Dieselfahrzeuge dagegen angestiegen. Grund für den Anstieg bei Dieselfahrzeugen sind laut KBA größere leistungsstarke Pkw mit Selbstzündern. Entwicklungen im Bereich der Dieselfahrzeuge verlaufen somit konträr zu Klimaschutzstrategien bzw. einer möglichen Dematerialisierung von Automobilen.

Die CO₂-Emissionen der Aluminiumbauweisen in der Nutzungsphase (siehe auch Tab. 11) liegen theoretisch sehr nahe an dem von der EU-Kommission geforderten Zielwert von 120 g/km. Allerdings hängt der lebenszyklusweite energetische Vorteil und damit die Nettobilanz der Treibhausgasemissionen der Aluminiumbauweisen sehr stark von dem Einsatz von Primär- und Sekundäraluminium ab, wie in Abb. 18 bis Abb. 20.

Mit einem Gewicht von 450 kg, das gegenüber dem VW Golf A4 um fast 600 kg vermindert ist, und einem CO₂-Ausstoß von 40,5 g/km verdeutlicht der Prototyp des Lo-remo, wie Reduzierungen im Fahrzeuggewicht in Kombination mit Änderungen im Pro-duktdesign sich synergetisch für Ressourcen- und Klimaschutz auswirken können.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

5.1 Zusammenfassung

Bezogen auf den Gesamt-TMR weist bei den hier betrachteten Fahrzeugen der VW Lupo in der Gruppe der gegenwärtig produzierten Automobile den geringsten Wert auf, gefolgt von dem Seat Ibiza, dem VW Golf A4 und der Mercedes S-Klasse. Auffällig sind die deutlichen Unterschiede im Ressourcenverbrauch in der Produktions- und Nutzungsphase. In der Produktionsphase unterscheiden sich die beiden Kleinwagen und der VW Golf A4 nur geringfügig. Der VW Lupo hat hier aufgrund seines höheren Anteils von Aluminium und Platingruppenmetallen trotz seines geringeren Fahrzeuggewichtes sogar einen größeren Ressourcenverbrauch als der Seat Ibiza. Aufgrund des geringeren Treibstoffverbrauchs ist der TMR des VW Lupo im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen in der Nutzungsphase jedoch deutlich niedriger und kompensiert damit den höheren TMR in der Produktionsphase. Die Mercedes S-Klasse weist nach diesen Berechnungen sowohl in der Produktions- als auch in der Nutzungsphase den höchsten Ressourcenverbrauch auf.

Veränderungen im Materialmix durch Werkstoffsubstitution können zu einer gewissen Verringerung des Ressourcenverbrauchs sowohl in der Produktions- als auch in der Nutzungsphase führen. Die Substitution von Stahl durch Leichtbauwerkstoffe (Aluminium, Kohlefaserverstärkte Kunststoffe) führt zu einer Verringerung des Fahrzeuggewichtes, was Einsparungen im Treibstoffverbrauch in der Nutzungsphase bewirkt und damit den geringeren Ressourcenverbrauch in der Nutzungsphase erklärt. In der Produktionsphase lassen sich ebenfalls Einsparungen erzielen. Bei den Aluminiumbauweisen ist dies jedoch stark von dem Verhältnis von Primär- und Sekundäraluminium abhängig. Bei dem hier dargestellten Verhältnis von 1:9 ergibt sich eine Verringerung des TMR. Bei einer Vergrößerung des Anteils von Primäraluminium schneidet die Aluminiumbauweise im Vergleich zur Stahlbauweise jedoch zunehmend schlechter ab (siehe auch Tab. 18). Solange die Verfügbarkeit von Sekundäraluminium begrenzt ist, sind auch der Verfolgung der Substitutionsstrategie Grenzen gesetzt.

Deutlich größere Einsparungen lassen sich durch Veränderungen im Produktdesign erzielen. So ist der TMR des Loremo sowohl in der Produktions- und insbesondere in der Nutzungsphase im Vergleich zu den gegenwärtig produzierten Fahrzeugtypen deutlich niedriger. Als Extremvariante ist das PAC-Car II mit dem geringsten Ressourcenverbrauch verbunden. Als „kraftstoffsparendstes Fahrzeug der Welt“ trifft dies besonders auf die Nutzungsphase zu.

Ähnliches trifft auch für den TMR pro 100 Fahrzeugkilometer zu, bei der die in den jeweiligen Sachbilanzen angegebene Laufleistung zu Grunde gelegt wurde. Bei einer so angenommen Laufleistung von 300.000 km für die Mercedes S-Klasse ist der TMR pro 100 km vergleichbar mit dem des VW Golf A4's, liegt aber noch deutlich über SEAT Ibiza und VW Lupo.

Die CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase sind eng mit dem Treibstoffverbrauch verbunden. Die Mercedes S-Klasse hat bei einem Verbrauch von 10,1 l pro 100 km somit die höchsten CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase, der Loremo mit 1,5 l pro 100 km den geringsten. Das PAC - Car II ist Brennstoffzellen betrieben und stößt somit während der Nutzungsphase keine CO₂-Emissionen aus.

Bezieht man die Produktionsphase mit ein und vergleicht das Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential) in CO₂ Äquivalenten, ist der Loremo unter den getroffenen Annahmen ebenfalls mit den geringsten Treibhausgaspotenzial verbunden; gefolgt von VW Lupo, Seat Ibiza, VW Golf A4 und der Mercedes S-Klasse.

Tab. 18 zeigt die theoretischen Potenziale zur Verringerung des Ressourcenaufwandes der gesamten Pkw-Produktion (TMR-Produktion) bezogen auf das Jahr 2000. Eine 100 prozentige Umstrukturierung der deutschen Automobilproduktion auf die Produktion von Kleinwagen nach der Bauweise von Seat Ibiza oder VW Lupo; das heißt das „Down-Sizing“ von gegenwärtig produzierten Fahrzeugtypen hin zu Kleinwagen bergen nicht unerhebliche Potenziale zur Ressourceneinsparung. Wesentlich größere Ressourceneinsparungen lassen sich jedoch durch tief greifende Veränderungen im Produktdesign (Loremo, Pac -Car II) erzielen.

Wie bereits erwähnt, lassen sich durch Werkstoffsubstitutionen nur begrenzt Ressourceneinsparungen erzielen. Bei den Aluminiumbauweisen ist dies zudem stark abhängig von dem Einsatz von Primär- und Sekundäraluminium. Bei einem gleichen Anteil von Primär- und Sekundäraluminium ergeben sich zum Beispiel schon negative Ressourceneinsparungen.

Tabelle 19 bezieht den TMR der Nutzungsphase mit ein und zeigt so die theoretischen Potenziale zur Verringerung des Ressourcenaufwandes der gesamten Pkw-Produktion bezogen auf das Jahr 2000, die sich durch Umstrukturierung der deutschen Automobilproduktion, Werkstoffsubstitution und Veränderung im Produktdesign über den gesamten Lebenszyklus der verschiedenen Automobil-Typen ergeben. Auch hier ergeben sich ähnliche theoretische Potenziale, wie für den Ressourcenaufwand der mit der Produktion verbunden ist. Aufgrund des im Vergleich zu den anderen konventionellen Fahrzeugtypen (VW Golf A4, Seat Ibiza, Mercedes S- Klasse) sehr viel niedrigeren Treibstoffverbrauch des VW Lupo in der Nutzungsphase sind die theoretischen Potenziale zur Verringerung des Ressourcenaufwandes für die verschiedenen Lupo Varianten über den gesamten Lebenszyklus betrachtet etwas höher als wenn man nur die Produktionsphase berücksichtigt (vgl. Tab. 18). Auch bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus lassen sich die größten theoretischen Potenziale zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs durch Veränderung im Produktdesign (Loremo, Pac-Car II) erzielen. Diese sind über den gesamten Lebenszyklus betrachtet ebenfalls größer als wenn man nur die Produktionsphase berücksichtigt (vgl. Tab. 18). Dies hängt mit dem extrem niedrigen Treibstoffverbrauch dieser beiden Fahrzeugtypen in der Nutzungsphase zusammen.

Tab. 17: TMR und Emissionen für verschiedene Autotypen

	Gegenwärtige Fahrzeugtypen				Zukünftige Fahrzeugtypen: Veränderung im Produktdesign		Werkstoffsubstitution				
	Seat Ibiza	VW Golf A4	Mercedes S-Klasse	VW Lupo	Loremo	PAC –Car II ¹²	VW Golf A4 (Al.-bauweise 1) ¹³	VW Golf A4 (Al.-bauweise 2) ¹²	VW Golf A4 Kunststoffbauweise (T50/PP) ¹⁴	VW Golf A4 (Multi Material)	VW Lupo (Material Mix)
Laufleistung laut Hersteller (km)	150.000	150.000	300.000	150.000	150.000 ¹⁵	150.000 ¹⁴	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000
Fahrzeuggewicht (kg)	962	1.059	1.805	800	450	32	799	731	731	749	610
Kraftstoffverbrauch (l/100km) NEDZ	6,7	6,55	10,1	3,0	1,5	0,018	5,44	5,15	5,16	5,27	2,4
TMR GESAMT (t)	31,3	34,8	62,1¹⁶	27,6	18,2	4,2	29,5	28,2	31,2	29,6	26,8
TMR Produktion (t)	18,3	22,1	43,1 ¹⁶	19,9	13,1	4,1	18,5	17,6	20,6	18,8	20,1
TMR Nutzung (t)	13,0	12,7	19,0 ¹⁶	7,7	5,1	0,1	11,0	10,6	10,6	10,8	6,7
TMR kg/100 km	20,90	23,17	27,04	18,40	12,16	2,80	19,68	18,78	20,83	19,75	17,86
CO ₂ (Nutzung) (g/km)	158,00	154,00	242,00	81,00	40,05	Keine Emissionen in der Nutzungsphase	128,80	122,10		124,80	64,35
CO ₂ (kg/100 km)	19,80	19,80	31,53	11,00							
SO ₂ (kg/100 km)	0,018	0,02	0,023	0,014							
NO _x (kg/100 km)	0,028	0,016	0,024	0,034							
NM VOC (kg/100 km)	0,06	0,07	0,07	0,025							
GWP 100 (t CO ₂ äquivalent)	30,1	32,2	51,8^{17,15}	17,4	10,0¹⁵						
Produktion:	4,0	4,7	11,0	4,1	3,0						
Nutzung:	24,0	25,2	37,1	12,2	6,3						
Herstellung von Treibstoff: ¹⁶	2,0	2,3	3,1	1,1	0,6						

¹² bei einem Kohlefaservolumenanteil von 0,6.¹³ Bei Verhältnis Primär- zu Sekundäraluminium 1:9.¹⁴ Bei einem Kohlefasertyp T–50 und Polypropylen als Matrixwerkstoff, sowie einem Volumenanteil der Kohlefaser von 0,4.¹⁵ Angenommene Laufleistung.¹⁶ Quelle: Saygin (in Vorbereitung), vorläufige Ergebnisse; Werte für Nutzung beinhalten nur CO₂, CH₄ und N₂O, Werte zur Herstellung von Treibstoff nur CO₂.¹⁷ Zwecks Vergleichbarkeit beziehen sich der TMR und GWP hier auf 150.000 km

Tab. 18: Theoretische Potenziale zur Verringerung des Ressourcenaufwandes (TMR_Produktion) der gesamten Pkw-Produktion (negative Werte bedeuten eine Erhöhung des Ressourcenverbrauchs)

Strategie	Theoretische Potenziale zur Verringerung des Ressourcenaufwandes(TMR_Produktion) der gesamten Pkw Produktion
Änderungen der Produktionsstruktur	
100% Kleinwagen	29%
Design a la VW Lupo (100%):	23%
VW Lupo mit 80% Sekundäraluminium	29%
Werkstoffsubstitution	
Substitution Alu vs. Stahl	
Verhältnis Primär- zu Sekundäraluminium: 1:9	17 bis 20% gegenüber der Produktion eines VW Golf A4s Stahlbauweise
1:1	-22 bis -26% gegenüber der Produktion eines VW Golf A4s Stahlbauweise
9:1	-61 bis -73% gegenüber der Produktion eines VW Golf A4s Stahlbauweise
Substitution Kunststoff vs. Stahl	
	Bis zu 10% ¹⁸ gegenüber der Produktion eines VW Golf A4s Stahlbauweise
Multimaterialmix	
VW Golf A4 Multimaterialmix (gleichbleibende Produktionsstruktur):	9%
100% VW Golf A4 Multimaterialmix:	27%
VW Lupo Multimaterialmix mit 80% Sekundäraluminium:	33%
Veränderungen im Produktdesign	
Loremo (100%)	49%
PAC-Car II (100%)	84%

¹⁸ abhängig vom Kohlefaseranteil und Kunststoffart

Tab. 19: Theoretische Potenziale zur Verringerung des Ressourcenaufwandes (TMR_Gesamt) der gesamten Pkw-Produktion (negative Werte bedeuten eine Erhöhung des Ressourcenverbrauches)

Strategie	Theoretische Potenziale zur Verringerung des Ressourcenaufwandes (TMR_Gesamt) der gesamten Pkw Produktion
Änderungen der Produktionsstruktur	
100% Kleinwagen	21%
Design a la VW Lupo (100%):	31%
VW Lupo mit 80% Sekundäraluminium	34%
Werkstoffsubstitution	
Substitution Alu vs. Stahl	
Verhältnis Primär- zu Sekundäraluminium: 1:9	15% bis 19% gegenüber eines VW Golf A4s Stahlbauweise
1:1	-9% bis -11% gegenüber eines VW Golf A4s Stahlbauweise
9:1	-34% bis -41% gegenüber der Produktion eines VW Golf A4s Stahlbauweise
Substitution Kunststoff vs. Stahl	
Multimaterialmix VW Golf A4 Multimaterialmix (gleichbleibende Produktionsstruktur):	Bis zu 10% ¹⁹ gegenüber der Produktion eines VW Golf A4s Stahlbauweise
100% VW Golf A4 Multimaterialmix:	9%
VW Lupo Multimaterialmix mit 80% Sekundäraluminium:	26%
	39%
Veränderungen im Produktdesign	
Loremo (100%)	54%
PAC-Car II (100%)	89%

5.2 Schlussfolgerungen

Die hier aufgeführten Berechnungen sind zum Teil mit großen Unsicherheiten verbunden. Dies liegt zum einen daran, dass aufgrund von Datenmangel eine Vielzahl von vereinfachten Annahmen getroffen werden mussten. Insgesamt sind nur wenige ausführliche Sachbilanzen zu verschiedenen Autotypen erhältlich. Aufgrund der verschiedenen Autorenschaft und der unterschiedlichen Ausführlichkeit der Sachbilanzen des VW Konzerns einerseits (Schweimer et al., 2005; Schweimer et al., 1999; Schweimer, 1998) und der Mercedes S-Klasse (DaimlerChrysler AG, 2005) andererseits ist ein Vergleich von Mercedes S-Klasse mit den anderen Fahrzeugen nur eingeschränkt möglich. Auch die Hochrechnung auf die Gesamtproduktion auf der Basis der drei verschiedenen Autotypen stellt bei der Vielzahl der verschiedenen produzierten Autotypen eine starke Vereinfachung dar. Allerdings können die ausgewählten Autotypen insofern als repräsentativ angesehen werden, als der VW Golf A4 als meistproduziertes Auto

¹⁹ abhängig vom Kohlefaseranteil und Kunststoffart

der Welt gilt und die Mercedes S-Klasse in Deutschland gegenwärtig den größten Marktanteil an neu zugelassenen Wagen in der Oberklasse hat. Im Jahr 2006 betrug dieser zum Beispiel 26% (KBA, 2006). Allerdings gibt es selbst innerhalb der Modellreihen (z.B. VW Golf A4) verschiedene Modelltypen, die sich hinsichtlich Gewicht, Antriebsart, Verbrauch usw. unterscheiden. Nichtsdestotrotz sollen die hier vorgestellten Berechnungen als erste Orientierung für Ressourceneinsparpotenziale am Produkt Auto dienen und liefern einige wichtige Erkenntnisse.

Hinsichtlich der theoretischen Potenziale zur Verringerung des Ressourcenverbrauches der deutschen Automobilproduktion wurde gezeigt, dass Werkstoffsubstitutionen (z.B. Aluminium vs. Stahl) nur begrenzte Potenziale eröffnen. Ausschlaggebend bei der Aluminiumbauweise ist der Einsatz von Primär- und Sekundäraluminium, der den Vergleich der beiden Bauweisen sowohl hinsichtlich des TMR als auch des gesamten Energiebedarfs maßgeblich beeinflusst.

Deutlich größere Potenziale ergeben sich durch „Down-Sizing“ sowie die Reduzierung des Fahrzeuggewichtes, wie für die theoretische radikale Umstrukturierung hin zu 100% Produktion von Kleinwagen nach dem Typ Seat Ibiza gezeigt wurde. Weitaus größere Potenziale sind durch grundlegende Änderungen im Produktdesign zu erwarten. Bei einer 100 prozentigen Umstellung der Fahrzeugflotte auf den Typ Loremo ließen sich z.B. 49% der Ressourcen in der Produktionsphase, bzw. 54% über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, einsparen. Als Extremvariante zeigt das PAC-Car II ein theoretisches Potenzial von bis zu 84% in der Produktionsphase, bzw. 89% über den gesamten Lebenszyklus betrachtet. Auch wenn ein solches Fahrzeug nicht als Familienkarosse dienen kann und die Funktionsäquivalenz zu heute produzierten Fahrzeugen nur bedingt gegeben ist, wird deutlich, dass durch dematerialisiertes Design erhebliche Potenziale erschlossen werden könnten.

Das geringe Fahrzeuggewicht und der geringe Treibstoffverbrauch von Loremo und PAC-Car II spiegeln sich auch in einem niedrigen TMR und niedrigeren CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase wider. Die lebenszyklusweiten CO₂-Emissionen sind für den Loremo unter den getroffenen Annahmen im Vergleich zu den konventionellen Bauweisen ebenfalls niedriger. Radikale Änderungen im Produktdesign in Richtung dematerialisierte Fahrzeuge bewirken somit nicht nur Einsparungen im Ressourcenverbrauch sondern auch Synergien zum Klimaschutz.

Erste Überlegungen zu einer Verlängerung der Lebensdauer (z.B. durch bessere Qualität und Wartung), Änderungen im Nutzungsverhalten und Einführung einer Obergrenze für CO₂-Emissionen pro 100 km lassen ebenfalls darauf schließen, dass in diesen Feldern Potenziale zur Ressourceneinsparung erschlossen werden könnten. Dies müsste jedoch durch weitergehende Untersuchungen vertieft werden.

5.3 Weiterführende Arbeiten

Aufgrund der eingeschränkten Anzahl der hier betrachteten Fahrzeugtypen und der generell schwierigen Datenlage wäre eine Ausweitung bzw. ein Vergleich innerhalb der verschiedenen Fahrzeugklassen mit weiteren Fahrzeugtypen wünschenswert. Dies setzt jedoch die Verfügbarkeit von Daten zu anderen Fahrzeugmodellen voraus. Eventuell könnte dies durch eine engere Kooperation mit der Automobilindustrie erreicht werden. So ließen sich auch die Unsicherheiten, die mit der Hochrechnung auf die Gesamtproduktion aufgrund von nur drei verschiedenen Autotypen verbunden sind, reduzieren. Zum Teil könnte man diese Unsicherheiten vermindern, indem die verschiedenen Massen (d.h. das Fahrzeugleergewicht) der einzelnen Autotypen innerhalb ihrer Klassen bei der Produktion stärker berücksichtigt werden. Eventuell könnten auch beispielhaft ausländische Fahrzeuge für einen Vergleich herangezogen werden. Da das Nutzerverhalten ebenfalls eine wesentliche Rolle spielt, sollte dies in weiterführenden Arbeiten näher betrachtet werden. Denkbar wäre z.B., dass man die verschiedenen Autotypen für verschiedene Zwecke einsetzt (z.B. den Kleinwagen im Stadtverkehr und die Oberklasse bei Fernreisen), auch um den unterschiedlichen Funktionen der verschiedenen Autotypen gerecht zu werden.

Der Ressourcenverbrauch zur Wasserstoffherstellung für das PAC-Car II wurde auf der Basis von gegenwärtigen Herstellungsverfahren (Cracking, Chlorelektrolyse) berechnet. Dies lässt sich eventuell mit alternativen Herstellungsverfahren, z.B. auf der Basis von Solarenergie, ergänzen.

6 Danksagung

Zunächst möchten wir dem Volkswagen Konzern sowie DaimlerChrysler für das zur Verfügung stellen der jeweiligen Sach- bzw. Umweltbilanzen danken. Weiterhin danken wir Herrn Sommer von der Loremo AG für Auskünfte bezüglich des Loremo sowie Herrn Kolb von der ETH Zürich für ausführliche Informationen zum PAC-Car II. Besonderer Dank gilt ebenfalls Herrn Ostertag für hilfreiche Kommentare zu einer Entwurfsfassung des Berichts. Dank für kritische Anregungen und Kommentare gilt auch den Kolleginnen und Kollegen des Wuppertal Institutes.

7 Literatur

- Altmann, M. / Blandow, V. / Niebauer, P. / Schindler, J. / Schurig, V. / Weindorf, W. / Wurster, R. / Zittel, W. (2002) Vergleich verschiedener Antriebskonzepte im Individualverkehr im Hinblick auf Energie- und Kraftstoffeinsparung. L-B-Systemtechnik GmbH, 855211 Ottenbrunn, www.lbst.de.
- Arge Altauto (2001) Arbeitsgemeinschaft Altauto - 1. Monitoringbericht.
- Ashby, M.F. (1999) Materials and Process Selection in Mechanical Design. Butterworth Heinemann, Oxford.
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen) (2005) Verkehr in Zahlen 2005/2006. 34. Jahrgang. Hamburg, Deutscher Verkehrsverlag.
- BMW Group (2002) Umwelterklärung BMW Werk Berlin.
- Broge, J.L. (2006) Managing and remaking metals. (Online) <http://www.sae.org/automag/features/managemetal/index.htm>.
- Consultic Marketing und Industrieberatung GmbH.(2004) Produktions- und Verbrauchsdaten für Kunststoffe in Deutschland unter Einbeziehung der Verwertung 2003. Plastics Europe Deutschland.
- DaimlerChrysler AG (2005) Umwelt-Zertifikat Mercedes-Benz S-Klasse. Mercedes-Benz Technology Center, D-71059 Sindelfingen.
- Eberle, R. und Franze, H.A. (1998) Modelling the use phase of passenger cars. In: LCI Proceedings Total Life Cycle Conference. Society of Automotive Engineers , Warrendale USA.
- Europäische Kommission (2006) Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. Implementing the Community Strategy to Reduce CO2 Emissions from Cars: Sixth annual Communication on the effectiveness of the strategy. Monitoring of ACEA's Commitment on CO2 Emission Reductions from Passenger Cars (2004). SEC(2006) 1078, Brussels.
- Europäische Kommission (2007) Kommission plant Rechtsrahmen, um die Erfüllung der EU-Ziele für geringere CO2 – Emissionen von Kraftfahrzeugen sicherzustellen. Europäische Kommission IP/07/155.
- Gernuks, M. (2005) Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Umweltaspekten mit der Ableitung von Umweltzielen im Rahmen von EMAS. Darmstadt Eigenverlag, 2005.
- Hagelüken, C. / Buchert, M. / Stahl, H. (2005) Stoffströme der Platingruppenmetalle – Systemanalyse und Maßnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle. GDMB Medienverlag, Clausthal-Zellerfeld.
- International Aluminium Institute (2000) Aluminium Applications and Society. Life Cycle Inventory of the worldwide Aluminium industry with regard to energy consumption and emissions of greenhouse gases. Paper 1 Automotive.
- Jambor, A. / Beyer, M. (1997) New cars – new materials. Materials and Design 18 (4), 203-209.
- Jochem, E., Schön, M., Angerer, G., Ball, M., Bradke, H., Celik, B., Eichhammer, W., Manns-bart, W., Marscheider-Weidemann, F., Nathani, C., Walz, R. und Wietschel, M. (2004) Werkstoffeffizienz – Einsparpotenzial bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe. Fraunhofer IRB Verlag.

- Jürgens, U. / Meißner, H.R. (2005) Arbeiten am Auto der Zukunft. Produktinnovationen und Perspektiven der Beschäftigten. Edition Sigma. Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung.
- Karus, M. / Ortmann, S. / Vogt, D. / Gahle, C. / Pendarovski, C. (2006) Einsatz von Naturfasern für Verbundwerkstoffe in der deutschen Automobilproduktion 1999 – 2005. Nova-Institut GmbH, Hürth.
- Kautt, J. (1998-2003) Vereinfachte Umwelterklärung Werk Sindelfingen. DaimlerChrysler
- KBA (2006) Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Segmenten und Modellreihen im Dezember 2006. Flensburg. (Online)
http://www.kba.de/Stabsstelle/Presseservice/Pressemitteilungen/pressemitteilungen2006/SegmenteModelle/segmente_12_2006.pdf
- KBA (2007) CO2 Emissionen: Benziner auf gutem Kurs. Pressemitteilung Nr 08/2007. Flensburg.
- Kolb, F. ETH Zürich. 12. März 2007.
- Krauß, U. / Wagner, H. / Mori, G. (1999) Geologisches Jahrbuch – Sonderhefte – Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe - Teilstudie Kupfer. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung(Nägele u. Obermiller).
- Lovins, A.B. Hypercars: The Next Industrial Revolution The Hypercar Center, Rocky Mountain Insitute.
- Metallstatistik (2005), Wirtschaftsvereinigung Metalle. Düsseldorf.
- Mertz, T. (1998) Diplomarbeit zur Materialintensität des Personenverkehrs – Eine Analyse nach dem MIPS-Konzept. Diplomarbeit. Universität Trier Fachbereich VI Geographie/Geowissenschaften.
- Niesing, B. (2006) Die neue Leichtigkeit. Fraunhofer Magazin 01/2006.
- Paulus, A. (2005) Ökonomische und ökologische Effekte der Nutzung des Werkstoffs Aluminium – Ein Beitrag zur Berücksichtigung der Nutzungsphase in der modellgestützten Stoffstromanalyse. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Saygin, D. (in Vorbereitung) Lightweight Concepts in a Compact Class Car. Master Thesis. Utrecht University and Wuppertal Institute.
- Schweimer, G.W. / Levin, M. (2005) Sachbilanz des VW Golf A4. Forschung Umwelt und Verkehr. Volkswagen AG, Wolfsburg und wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Gesamthochschule Kassel.
- Schweimer, G.W. (1998) Sachbilanz des 3 Liter Lupo. Volkswagen AG, Wolfsburg Forschung, Umwelt und Verkehr.
- Schweimer, G.W. / Bambl, T. / Wolfram, H. (1999) Sachbilanz des Seat Ibiza. Seat S.A. Comunicacion Sector A, Calle 2, No 1.
- Seitz, G. (2006) Werkstoffe für den Fahrzeugleitungssatz. Trends und Anforderungen. Vorge-tragen beim 9. Kooperationsforum Industriearbeitskreis Bordnetze Werkstoffe – Architek-turen, Systemlösungen. Audi AG Ingolstadt.
- Stahlzentrum (2006) Stahl in Zahlen. Stahlverwendung in Deutschland. http://www.stahl-online.de/wirtschaft_und_politik/stahl_in_zahlen/stahl_in_zahlen.htm

- Suzuki, T. / Takahashi, J. (2005) Prediction of Energy Intensity of carbon fiber reinforced plastics for mass-produced passenger cars.
- The Aluminium Association (1998) Aluminium for Automotive Body Sheet Panels
<http://www.autoaluminum.org/>
- VDA Verband der Automobilindustrie (2005) Tatsachen und Zahlen – 69. Folge 2005. VDA Verband der Automobilindustrie, Frankfurt/Main.
- Verband Kunststoffherzeugende Industrie e.V. (VKE) (1998) Kunststoff im Automobil – Einsatz und Verwertung – Langfassung. Verband Kunststoffherzeugende Industrie e.V. (VKE) Frankfurt/Main.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) (2005) Vehicle technologies other than propulsion systems.

8 Annex

Tab. 20: Materialeigenschaften der Kohlefasern auf PAN Basis

	Dichte (g/cm ³)	Zug E-Modul (GPa)	Zugfestigkeit (GPa)	Bruchdehnung (%)
G30	1,78	234	3,79	1,62
G40	1,77	300	4,97	1,66
G50	1,78	358	2,48	0,70
AS4	1,80	235	3,80	1,53
IM6	1,73	276	4,38	1,50
HMU	1,84	380	2,76	0,70
T-650/35	1,77	241	4,55	1,75
T-650/42	1,78	290	5,03	1,70
T-50	1,81	390	2,42	0,70

Tab. 21: Materialeigenschaften des Matrixwerkstoffes

Matrixwerkstoff	Dichte (g/cm ³)	Zug E-Modul (GPa)
Epoxidharz	1,255	2,711
Polypropylen (PP)	0,9	1,223

$$E_c = f_v E_{cf} + (1 - f_v) E_m$$

$$f_w = \frac{f_v \rho_{cf}}{f_v \rho_{cf} + (1 - f_v) \rho_m}$$

$$\rho_c = f_v \rho_{cf} + (1 - f_v) \rho_m$$

mit:

E_c = Elastizitätsmodul des Verbundwerkstoffes

E_{cf} = Elastizitätsmodul der Kohlefaser

E_m = Elastizitätsmodul des Matrixwerkstoffes

f_v = Volumenanteil der Kohlefaser im Verbundwerkstoff

f_w = Gewichtsanteil der Kohlefaser im Verbundwerkstoff

ρ_c = Dichte des Verbundwerkstoffes

ρ_{cf} = Dichte der Kohlefaser

ρ_m = Dichte des Matrixwerkstoffes